

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département : Electrotechnique et d'automatique



جامعة أحمد زبانة - غليزان  
Ahmed Zabana Relizane University

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :  
Electrotechnique industrielle

Intitulé

**Etude et simulation d'un système photovoltaïque associé  
à un convertisseur DC-DC contrôlé par MPPT**

**Présenté par :**

Mr : SABEUR Mohammed Yacine

Mr : CHENINE Nasr-Eddine

**Devant les membres de jury :**

<b>Président :</b> Mr	BELABBAS Adda	Maître de conférences (B)	(U. Relizane)
<b>Encadrant :</b> Mr	NAMOUNE Abdelhadi	Maître de conférences (A)	(U. Relizane)
<b>Examineur :</b> Mr	BESSIS Benhalima	Maître de conférences (B)	(U. Relizane)

**Année universitaire : 2024/2025**

## **Remerciement**

Avant tous, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu le Tout –Puissant et Miséricordieux, qui nous a dotés du courage, et la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans le soutien et la contribution de nombreuses personnes. Nous souhaitons ici leur adresser nos sincères remerciements.

Nous exprimons d'abord notre gratitude à notre encadrant **Mr. NAMOUNE Abdel Hadi** et **Mr. LAANTRI TAYEB**, pour son encadrement attentif, ses conseils avisés, ses remarques pertinentes qui ont grandement encadré notre travail.

Nous remercions vivement les membres du jury qui ont pris le temps d'examiner notre travail avec grand professionnalisme.

Nos remerciements les plus sincères vont également à tous nos professeurs, dont l'enseignement et les compétences nous ont guidés tous ont long de nos études. Nous sommes également reconnaissants envers tous les enseignants qui ont marqué ces années d'apprentissage.

Nous adressons une pensée chaleureuse à nos proches, familles et amis pour leur soutien indéfectible.

En fin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail. Votre aide précieuse et votre soutien ont été essentiels.

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail avec gratitude et amour :

A ma chère maman pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements

Constants.

A ma sœur bien –aimée, douce et attentionnée.

A la mémoire de mon père décédé, pour les valeurs précieuses qu'il m'a transmises.

Et à tous mes amis pour leur amitié sincères.

Merci à tous pour votre présence et votre soutien.

***NASREDDINE***

---

## Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma mère et mon père, piliers de mon existence, qui m'ont toujours soutenue avec constance.

A ma sœur, avenante et affable et à mes frères, étoiles de mon ciel, gardiens de ma sérénité.

A toute ma famille dont l'encouragement ne faiblit jamais.

A mes amis fidèles, qui embellissent ma vie de leur précieux amour.

***YACINE***

---

---

## SOMMAIRE

Remerciement .....	2
Dédicace .....	3
Dédicace .....	4
SOMMAIRE.....	5
Listes des figures .....	8
INTRODUCTION GENERALE.....	10
Introduction : .....	11
Chapitre I :.....	13
Généralité sur les systèmes photovoltaïques.....	13
I.1 Introduction : .....	14
I.2 Energie solaire :.....	14
I.3 Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque :.....	15
I.4 Rayonnement solaire : .....	15
I.4.1 Le rayonnement direct : .....	16
I.4.2 Le rayonnement diffus :.....	16
I.4.3 Le rayonnement réfléchi :.....	16
I.5 Le système photovoltaïque : .....	16
I.6 énergie photovoltaïque :.....	17
I.7: Les composants d'un système photovoltaïque : [12] .....	17
I.8: Types de systèmes PV : .....	17
I.8.1 : Systèmes autonomes .....	18
I.8.2 Systèmes raccordés au réseau.....	18
I.8.3 Systèmes hybrides.....	18
I.9 Type de raccordement des panneaux solaires [14].....	18
I.9.1 - Raccordement série .....	18
I.9.2- Raccordement parallèle .....	18
I.9.3- Raccordement mixte (série-parallèle).....	19
I.10 Effet Photovoltaïque : [15] .....	19
I.11 Les panneaux photovoltaïques : .....	20

---

I.12	Cellule photovoltaïque :	20
I.13	Fabrication des cellules photovoltaïques :	21
I.14	Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire PV :	22
I.15	Différents types de cellules photovoltaïques [9] :	23
I.15.1	Les cellules monocristallines :	23
	Avantage :	23
	Inconvénients :	24
I.15.2	Les cellules poly-cristallines :	24
	Avantage :	25
	Inconvénients :	25
I.15.3	Les cellules amorphes :	25
	Avantage :	25
	Inconvénients :	26
I.15.4	Les cellules multi-jonctions :	26
I.15.5	Les cellules organiques :	27
I.16	Module (ou panneau) photovoltaïque :	27
I.17	Champ photovoltaïque :	27
I.18	Avantages du système photovoltaïque :	28
I.19	Les inconvénient du système photovoltaïque :	29
I.20	Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque:	29
I.20.1	Les batteries :	29
I.20.2	Les super-condensateurs :	30
I.20.3	Les piles à combustible :	30
I.20.4	Les volants d'inertie :	31
I.20.5	Stockage hybride :	31
I.21	Conclusion :	32
Chapitre II	:	33
II.1	INTRODUCTION :	34
II.2	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :	34
II.3	Principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC :	35
II.4	Domaine d'utilisation des hacheurs :	35

---

II.5 Différents types d'hacheurs :.....	35
II.5.1 Hacheur dévolteur ou abaisseur (Buck) : .....	35
II.5.2 Hacheur survolteur ou élévateur (boost) :.....	36
II.5.3 Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost) :.....	36
II.6 : Hacheur survolteur ou élévateur (boost) : .....	37
II.6.1 Les avantage : [27] .....	37
II.6.2 Applications :.....	37
II.7 La commande MPPT :.....	41
II.8 Principe de La commande MPPT : .....	42
II.9 Classification Des Commandes MPPT : .....	43
II.9.1 MPPT indirecte :.....	43
II.9.2 MPPT Directe : .....	43
II.10 Les algorithmes MPPT :.....	44
II.10.1 Méthodes a contre réaction de tension :.....	45
II.10.2 Méthodes a contre réaction de courant : .....	46
II.10.3 Méthodes a contre réaction de puissance : .....	47
II.11 Conclusion :.....	48
Chapitre III :.....	49
III.1 Introduction : .....	50
III.2 simulation et résultat : .....	50
III.2.1 Simulation de convertisseur de puissance survolteur boost.....	50
III.2.2 Simulation de système photovoltaïque avec la commande P&O :.....	51
III.2.3 Résultats : .....	53
III.2.3.1 caractéristique de tension : .....	53
III.2.3.2 Caractéristique de puissance :.....	54
III.2.3.3 Caractéristique de courant :.....	55
III.2.4. Influence de l'éclairement sur le système :.....	55
III.3 Conclusion :.....	57
CONCLUSION GENERALE.....	58
Résume :.....	61
Références Bibliographiques .....	62

## Listes des figures

Figure I 1:L'énergie solaire. ....	14
Figure I 2: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.I.6 Les différents types de rayonnement solaire. ....	15
Figure I 3: Les différents types de rayonnements solaires.....	16
Figure I 4:Conversion Energie solaire en Energie électrique. ....	17
Figure I 5:Raccordement des panneaux solaires série.....	18
Figure I 6:Raccordement des panneaux solaires parallèle.....	19
Figure I 7:Raccordement des panneaux solaires mixte. ....	19
Figure I 8:Cellule photovoltaïque.....	21
Figure I 9:Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque. ....	23
Figure I 10:Cellule au silicium monocristallin.....	24
Figure I 11:Cellule au silicium poly cristalline.....	25
Figure I 12:Cellule au silicium amorphe. ....	26
Figure I 13:Cellule au silicium multi jonction. ....	26
Figure I 14:Cellule au silicium amorphe. ....	27
Figure I 15:Module et champ photovoltaïque.....	28
Figure II 1:Schéma de principe d'un convertisseur.....	34
Figure II 2:Hacheur dévolteur ou abaisseur.....	36
Figure II 3:Hacheur survolteur ou élévateur.....	36
Figure II 4:Hacheur abaisseur-élévateur.....	37
Figure II 5:Système photovoltaïque suivi par un hacheur de type Boost.....	38
Figure II 6:Convertisseur Boost durant l'état " ON". ....	39
Figure II 7:Convertisseur Boost durant l'état "OFF". ....	40
Figure II 8:Etage d'adaptation. ....	42
Figure II 9:Principe de la commande MPP [14]. ....	43
Figure II 10:Organigramme de classifications des commandes MPPT. ....	44
Figure II 11:Algorithme de circuit ouvert [17]. ....	46
figure II 12::Algorithme de court-circuit [17].....	47
Figure III 1:Schéma de simulation du hacheur survolteur BOOST. ....	51
Figure III 2:Tension de sortie du hacheur survolteur. ....	51
Figure III 3: Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O). ....	52
Figure III 4 : voltage générée par la GPV pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ . ....	53
Figure III 5 : Tension de sortie du système pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ . ....	53
Figure III 6 : Puissance d'entrée du système pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$ . ....	54

Figure III 7: Puissance sortie du système pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ . .....	54
Figure III 8: Courant de l'entrée et sortie du système pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$ . .....	55
Figure III 9: la tension d'entrée et sortie du système pour $T= 25\text{C}$ et différentes irradiation [1000 800 600 400]. .....	56
Figure III 10: la puissance d'entrée et sortie du système pour $T= 25\text{C}$ et différentes irradiation [1000 800 600 400]. .....	56
Figure III 11: le courant d'entrée et sortie du système pour $T= 25\text{C}$ et différentes irradiation [1000 800 600 400]. .....	57

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction :

Dans un contexte mondial marqué par une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux, la recherche de sources d'énergie durables, propres et renouvelables est devenue une priorité stratégique pour tous les pays. L'électricité, indispensable au développement économique, industriel et technologique, repose encore largement sur des ressources fossiles limitées et polluantes, telles que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Or, ces ressources, bien qu'efficaces à court terme, posent de sérieuses menaces à long terme, notamment en termes de réchauffement climatique, d'émissions de gaz à effet de serre et de raréfaction [1].

Face à cette réalité, les énergies renouvelables, et en particulier l'énergie solaire, s'imposent comme une alternative prometteuse. Parmi les différentes formes d'exploitation de l'énergie solaire, la conversion photovoltaïque est l'une des plus attractives. Elle permet la transformation directe du rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque, sans émission de CO<sub>2</sub>, sans bruit, et avec des coûts d'exploitation très faibles [2]. Cette technologie, en constante évolution, constitue aujourd'hui une composante essentielle du mix énergétique mondial et un levier important pour l'autonomie énergétique, en particulier dans les zones isolées.

Cependant, l'exploitation optimale de l'énergie photovoltaïque reste un défi technique. En effet, la puissance délivrée par les panneaux solaires dépend fortement des conditions d'ensoleillement et de température, qui varient au cours de la journée et selon les saisons. Pour maximiser l'énergie extraite du générateur photovoltaïque (GPV), il est nécessaire d'adapter en permanence le point de fonctionnement du système afin de suivre ce que l'on appelle le Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point, MPP). Cette tâche est assurée par des algorithmes de poursuite du MPP (MPPT : Maximum Power Point Tracking), intégrés à un convertisseur statique DC-DC [3].

Le convertisseur joue un rôle crucial dans ce processus. Il sert de lien entre le générateur photovoltaïque et la charge ou le réseau électrique, et permet d'ajuster la tension et le courant de manière à optimiser la puissance transférée. Parmi les différentes topologies de convertisseurs DC-DC, le convertisseur Boost (ou survolteur) est largement utilisé pour augmenter la tension d'un générateur solaire à faible tension [4].

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique d'optimisation des systèmes photovoltaïques. Il a pour objectif de modéliser, simuler et analyser un système photovoltaïque associé à un convertisseur Boost, contrôlé par un algorithme MPPT de type Perturb & Observe (P&O). Ce type d'algorithme, simple à implémenter et efficace dans des conditions stables, permet d'ajuster dynamiquement le rapport cyclique du convertisseur pour suivre au mieux les variations du MPP [3].

Le travail est structuré autour de trois chapitres complémentaires :

Le premier chapitre dresse un panorama complet des systèmes photovoltaïques. Il présente les principes physiques de l'effet photovoltaïque, les différents types de cellules et modules solaires, les méthodes de stockage de l'énergie, ainsi que les architectures de systèmes photovoltaïques autonomes ou connectés au réseau.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des convertisseurs DC-DC. Il décrit les différentes topologies existantes (Buck, Boost, Buck-Boost), leur principe de fonctionnement, ainsi que leur rôle dans l'adaptation entre le générateur solaire et la charge. Il introduit également les techniques MPPT, en distinguant les approches directes et indirectes, et en détaillant les algorithmes les plus courants.

Le troisième chapitre présente la modélisation et la simulation du système étudié sous l'environnement MATLAB/Simulink. Il met en œuvre un générateur photovoltaïque connecté à un convertisseur Boost commandé par l'algorithme P&O. Les résultats obtenus permettent d'analyser l'efficacité du suivi du MPP, l'évolution de la tension, du courant et de la puissance en fonction des conditions d'éclairement, et de valider la performance du système global.

Ce travail ambitionne non seulement de renforcer la compréhension théorique des systèmes photovoltaïques, mais aussi de démontrer, par la simulation, l'efficacité des techniques d'optimisation MPPT dans le cadre d'une conversion DC-DC. Il s'inscrit pleinement dans les enjeux actuels de transition énergétique, de durabilité et de modernisation des réseaux électriques.

# **Chapitre I :**

## **Généralité sur les systèmes photovoltaïques**

## I.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la conversion directe de la lumière en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. Ces dispositifs exploitent l'effet photovoltaïque, un phénomène physique par lequel une tension électrique est générée lorsque la cellule est exposée au rayonnement lumineux. L'amplitude de la tension produite dépend des propriétés du matériau semi-conducteur utilisé dans la fabrication de la cellule.

Le raccordement de plusieurs cellules photovoltaïques en série et/ou en parallèle permet de constituer un générateur photovoltaïque (GPV), dont la caractéristique courant-tension (I-V) est non linéaire et présente un point de puissance maximale (MPP). Actuellement, selon les exigences d'utilisation, l'énergie électrique produite peut soit alimenter directement une charge en courant continu, soit être stockée dans des batteries pour une utilisation différée.

Afin de mieux appréhender ce phénomène, ce chapitre présente un rappel des notions fondamentales liées à l'effet photovoltaïque, au fonctionnement des cellules photovoltaïques ainsi qu'aux différents modèles qui permettent de les représenter [5].

## I.2 Energie solaire :

L'énergie solaire constitue la ressource énergétique la plus abondante à l'échelle planétaire et sert de fondement à plusieurs formes d'énergies renouvelables. Néanmoins, sa disponibilité est intermittente, notamment en l'absence d'ensoleillement nocturne. Elle est produite par la conversion du rayonnement solaire en énergie exploitable.



Figure I 1:L'énergie solaire.

Sur notre planète, on trouve diverses formes d'énergie solaire :

- L'énergie thermique.
- L'énergie thermodynamique.
- L'énergie photovoltaïque.

### I.3 Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque :

Comme évoqué plus tôt, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) permet de transformer directement la lumière en électricité grâce à des cellules solaires. Elle représente une alternative pertinente, particulièrement adaptée pour des besoins énergétiques modérés. [6]

### I.4 Rayonnement solaire :

Le soleil demeure la principale source d'énergie, bien que la distance qui le sépare de la Terre (environ 150 millions de kilomètres) soit considérable [7]. Il émet de l'énergie sous forme de rayonnement solaire constitué de photons. Dans l'espace, en dehors de l'atmosphère, l'intensité de ce rayonnement est d'environ  $1350 \text{ W/m}^2$ . Toutefois, en traversant l'atmosphère terrestre, ce rayonnement subit une réduction et une modification de son spectre, causées par l'absorption et la diffusion par les gaz, l'eau et les particules. Par exemple, la couche d'ozone filtre une partie de ce spectre, notamment les ultraviolets, qui peuvent être dangereux pour la santé. Au niveau du sol, lorsque les rayons sont perpendiculaires à la surface (à  $90^\circ$ ), l'intensité du rayonnement solaire direct atteint environ  $1000 \text{ W/m}^2$  en raison des pertes dans l'atmosphère (AM1).

Cette valeur varie en fonction de l'angle d'incidence des rayons lumineux par rapport à la surface terrestre. Plus l'angle de pénétration  $\theta$  est faible, plus l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons est importante, entraînant ainsi une perte d'énergie plus conséquente. Par exemple, lorsque l'angle d'incidence est de  $48,2^\circ$ , l'énergie directe du rayonnement solaire qui atteint le sol est d'environ  $833 \text{ W/m}^2$  (AM1.5), comme indiqué dans la Figure I.2 [8].

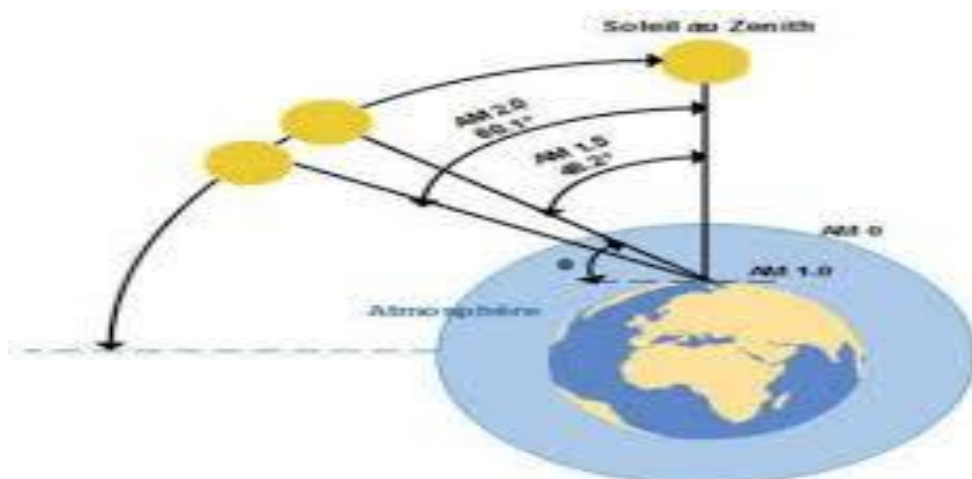


Figure I 2: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.I.6 Les différents types de rayonnement solaire.

### I.4.1 Le rayonnement direct :

Les rayons solaires parviennent au sol directement, sans être dispersés par l'atmosphère, et conservent leur caractère parallèle.

### I.4.2 Le rayonnement diffus :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire entre en contact avec des particules comme les nuages ou la poussière, ce qui provoque la déviation du faisceau d'origine en plusieurs rayons diffusés dans différentes directions.

### I.4.3 Le rayonnement réfléchi :

Cela provient de la réflexion des rayons lumineux sur des surfaces réfléchissantes, telles que la neige. L'intensité de cette réflexion est déterminée par l'albédo, Autrement dit, il s'agit de la faculté d'une surface à renvoyer la lumière. Le rayonnement global résulte de l'ensemble de ces composantes, comme l'illustre la figure I.3 [9].



Figure I 3: Les différents types de rayonnements solaires.

### I.5 Le système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque (SPV) est constitué d'un générateur solaire, d'une interface de conversion comprenant des convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC associés à un système de commande, ainsi que d'une charge électrique. La mission principale du convertisseur est

d'adapter l'impédance entre les composants afin d'optimiser la puissance extraite du générateur. [10]

### I.6 énergie photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque, classée parmi les sources d'énergie renouvelables, permet de produire de l'électricité en transformant le rayonnement du soleil à l'aide de cellules photovoltaïques (voir fig I.4). Un ensemble de cellules connectées forme un module ou panneau solaire. Lorsque plusieurs de ces modules sont regroupés, ils composent un champ photovoltaïque. [11]

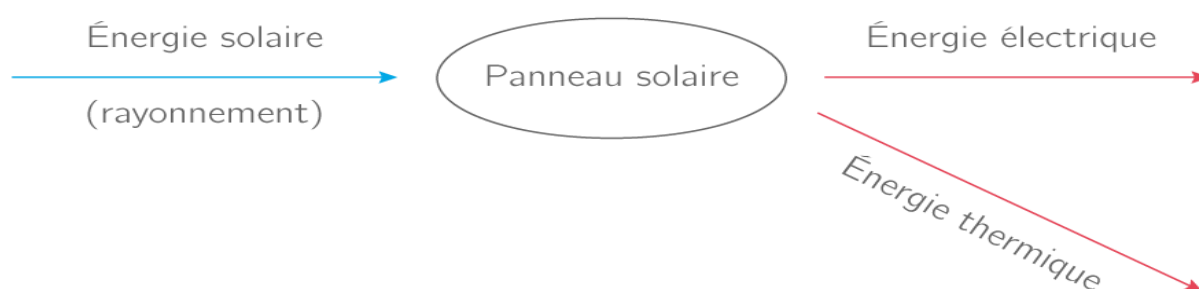


Figure I 4: Conversion Energie solaire en Energie électrique.

### I.7: Les composants d'un système photovoltaïque : [12]

Pour bien appréhender le fonctionnement d'un système photovoltaïque, il est essentiel d'examiner ses principaux éléments. Ces composants varient en fonction de l'application envisagée. Un système photovoltaïque comprend divers éléments tels que :

- Les modules
- Les batteries
- Les convertisseurs
- Les générateurs
- Le stockage
- Les régulateurs de charge

### I.8: Types de systèmes PV :

Les systèmes photovoltaïques sont catégorisés selon trois types : autonomes, hybrides et connectés au réseau électrique. Le choix du type dépendra de vos exigences, de votre localisation et de vos moyens financiers. [13]

### I.8.1 : Systèmes autonomes

Un système autonome nécessitera des batteries de stockage d'énergie, étant complètement indépendant d'autres sources d'énergie

### I.8.2 Systèmes raccordés au réseau

Ces systèmes sont employés dans les bâtiments, les maisons ou les résidences secondaires déjà connectés au réseau électrique.

### I.8.3 Systèmes hybrides

Ils tirent une portion de leur énergie de sources supplémentaires, telles que des éoliennes ou des générateurs à combustible, qui sont fréquemment associés aux modules des systèmes photovoltaïques. Ces installations comprennent généralement des batteries pour le stockage de l'énergie [10].

## I.9 Type de raccordement des panneaux solaires [14]

### I.9.1 - Raccordement série

Le raccordement en série des modules photovoltaïques permet d'augmenter la tension totale du système, tandis que le courant reste constant. La tension globale est la somme des tensions de chaque module, alors que le courant est limité par celui du module le plus faible. Ce type de connexion est utilisé pour obtenir une tension suffisante pour alimenter des convertisseurs ou des équipements, mais il est sensible aux ombrages ou aux défauts d'un seul panneau.



Figure I 5:Raccordement des panneaux solaires série.

### I.9.2- Raccordement parallèle

Le raccordement en parallèle permet de conserver la même tension que celle d'un seul module tout en augmentant le courant total du système. Il est plus tolérant aux pannes partielles qu'un raccordement en série, mais nécessite parfois des dispositifs de protection (diodes). Ce montage est adapté aux applications nécessitant un fort courant à faible tension.



Figure I 6: Raccordement des panneaux solaires parallèle.

### I.9.3- Raccordement mixte (série-parallèle)

Le raccordement mixte associe modules en série (pour augmenter la tension) et en parallèle (pour augmenter le courant). Il offre une solution équilibrée et flexible, adaptée aux installations nécessitant des puissances élevées, mais demande une conception soignée et une bonne protection électrique.

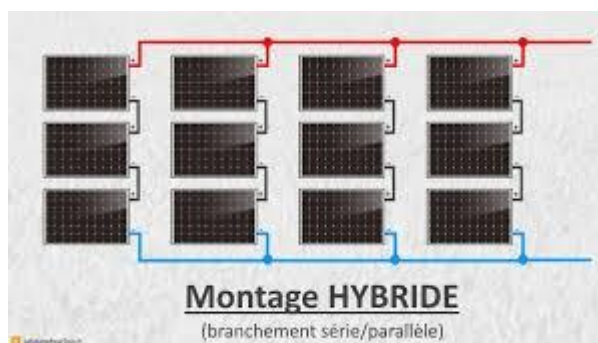


Figure I 7: Raccordement des panneaux solaires mixte.

### I.10 Effet Photovoltaïque : [15]

Le mot « photovoltaïque » dérive du grec « photos », signifiant lumière, et de « volta », en référence au physicien italien. Ce phénomène, l'effet photovoltaïque, se manifeste dans les cellules solaires, où il permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Les rayons solaires sont constitués de photons, ou particules de lumière, dont l'énergie varie en fonction de la longueur d'onde

L'effet photovoltaïque fait partie des effets photoélectriques. Il est utilisé dans les cellules photovoltaïques pour générer de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Ce phénomène se produit lorsque les photons sont absorbés par un matériau semi-conducteur, ce qui provoque la génération de paires électrons-trous (lorsqu'un électron de la bande de valence est excité vers la bande de conduction), créant ainsi une tension ou un courant électrique

Divers types de composants peuvent être fabriqués à partir de ce principe, tels que les photodiodes, les phototransistors ou les photopiles. Cet effet photovoltaïque est notamment exploité dans les panneaux solaires photovoltaïques

### **I.11 Les panneaux photovoltaïques :**

Les panneaux photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse en électricité sous forme de courant continu (DC). On les appelle aussi modules photovoltaïques. Ils sont composés de cellules photovoltaïques, protégées par un support souple ou rigide. Leur identification se fait généralement en fonction de la technologie des cellules utilisées:

- Panneaux au silicium cristallin (monocristallins ou polycristallins)
- Panneaux au silicium amorphe
- Panneaux multi-jonctions

Habituellement, les panneaux sont connectés en série pour accroître la tension du système, puis ces séries de panneaux sont interconnectées en parallèle afin d'augmenter le courant. Ces ensembles de chaînes sont par la suite reliés à un convertisseur DC/DC et à des batteries, ou à un investisseur afin de transformer directement l'énergie continue en courant alternatif pour une utilisation quotidienne. [15]

### **I.12 Cellule photovoltaïque :**

La cellule photovoltaïque est constituée d'un matériau semi-conducteur qui capte l'énergie de la lumière et la convertit directement en électricité.

La conversion de l'énergie solaire en électricité repose sur l'effet photovoltaïque, qui désigne la capacité des photons à créer des porteurs de charge, tels que les électrons et les trous, dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est exposé à un rayonnement de longueur d'onde appropriée, l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques de la bande de valence vers la bande de conduction du matériau.

Ce processus génère des couples électron-trou, capables de contribuer au transport du courant à travers le matériau lorsqu'il est soumis à une polarisation. Semblable à une diode utilisée en électronique traditionnelle, une cellule photovoltaïque (fig. I.8) peut être fabriquée à partir de deux couches de silicium, l'une dopée de type P (avec du bore) et l'autre dopée de type N (avec du phosphore). Une jonction PN se forme entre ces deux zones, créant ainsi une barrière de potentiel.

Une grille métallique recouvre la zone N, agissant non seulement comme une cathode (contact de face) mais aussi comme des collecteurs d'électrons. Une autre face du cristal est couverte par une plaque métallique (contact arrière) qui fonctionne d'anode [16].

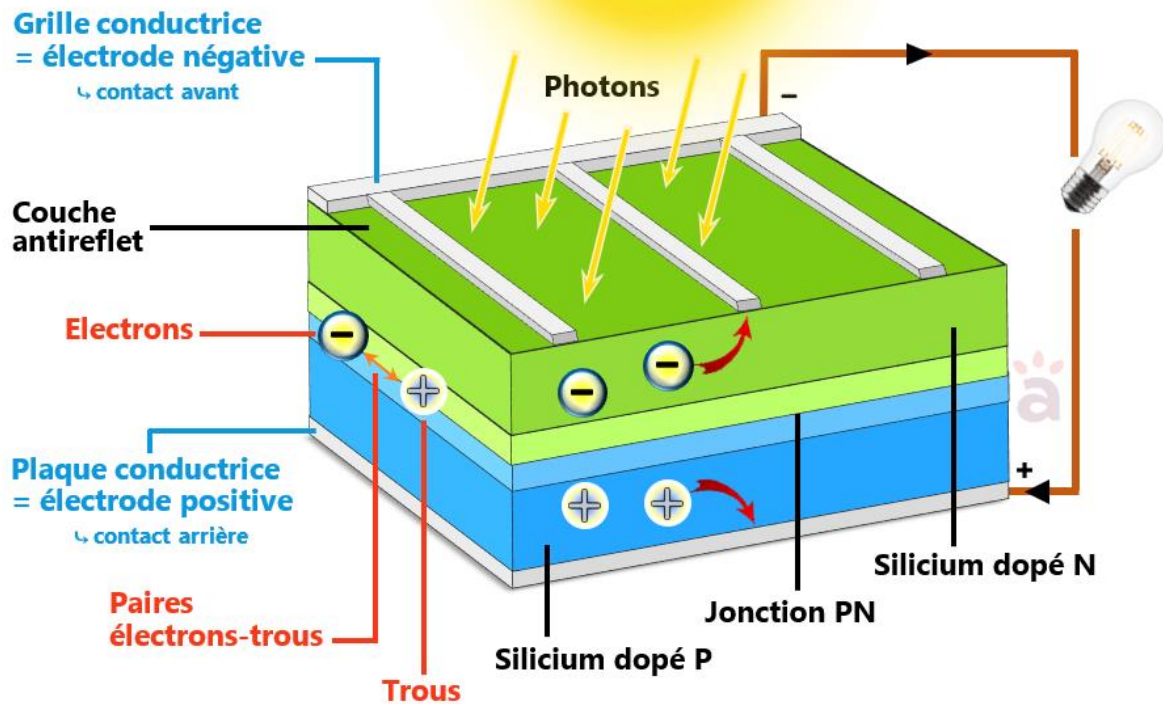


Figure I 8: Cellule photovoltaïque.

### I.13 Fabrication des cellules photovoltaïques :

Le silicium est actuellement le matériau le plus couramment utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Il est produit par réduction de la silice, un composé abondant dans la croûte terrestre, notamment dans le sable et le quartz. La première étape de sa production consiste à obtenir du silicium métallurgique, avec une pureté de 98 %, à partir de morceaux de quartz extraits de galets. Pour obtenir du silicium photovoltaïque de haute qualité, il doit être purifié à plus de 99,999 %, un processus qui implique de transformer le silicium en un composé chimique, puis de le distiller avant de le reconvertir en silicium pur. Ce silicium est ensuite fabriqué sous forme de barres appelées « lingots », qui peuvent être rondes ou carrées. Ces lingots sont découpés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur, appelées wafers. Après un processus de dopage avec des éléments spécifiques, on obtient du silicium semi-conducteur de type P ou N. Les wafers sont ensuite métallisés, c'est-à-dire que des rubans

métalliques sont incrustés à leur surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés, les wafers deviennent des cellules photovoltaïques. [17]

#### **I.14 Principe de Fonctionnement d'une cellule solaire PV :**

La cellule photovoltaïque est une photodiode à jonction PN de grande taille qui génère un signal électrique sans nécessiter d'apport d'énergie externe. Lorsque les photons du soleil frappent la cellule, une partie est réfléchi, tandis que d'autres traversent ou sont absorbés par la cellule solaire. Ce sont uniquement les photons absorbés qui participent à l'effet photoélectrique

Trois phénomènes physiques, étroitement connectés et simultanés, sont au cœur de l'opération de conversion photovoltaïque :

- L'absorption de la lumière dans le matériau,
- Le transfert d'énergie des photons vers les porteurs de charge électriques
- La capture des porteurs de charge.

Il est donc évident que les matériaux qui composent une cellule solaire doivent avoir des caractéristiques optiques et électriques particulières pour réaliser la conversion photovoltaïque.

Pour récupérer les paires électron-trou générées, il est nécessaire d'utiliser un champ électrique pour séparer les paires électrons/trou créées. La méthode la plus couramment employée pour cela est l'usage d'une jonction PN.

Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I 9.

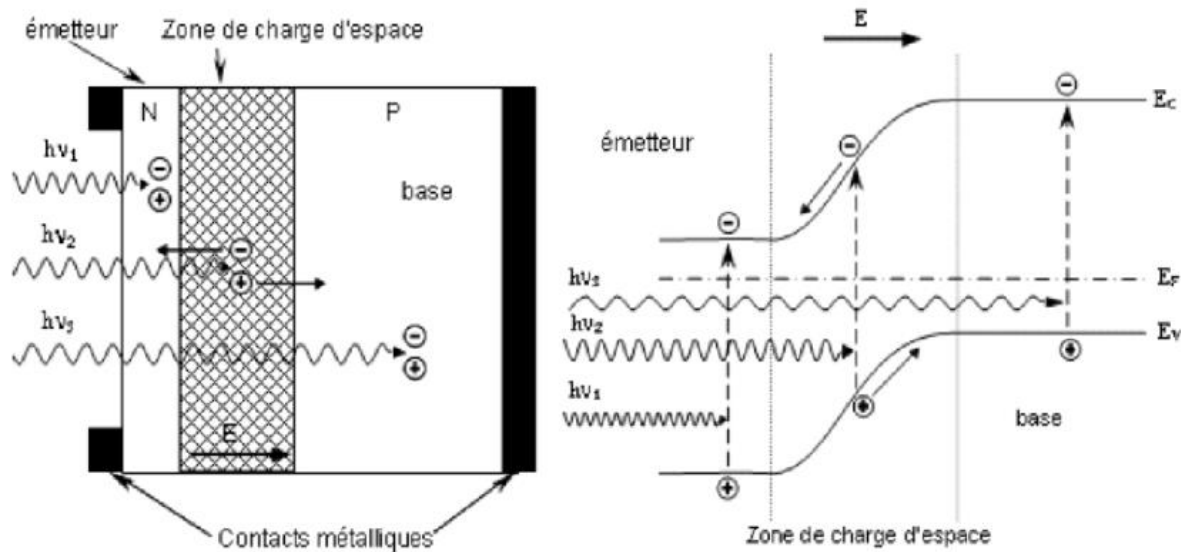


Figure I 9: Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.

Les photons qui frappent le matériau créent des paires électron-trou dans les zones de type N et P, ainsi que dans la région de la charge d'espace. Le comportement de ces paires varie en fonction de la région où elles sont générées :

Dans les zones N et P, les porteurs minoritaires se diffusent. Ceux qui pénètrent dans la zone de charge d'espace sont orientés par le champ électrique : les trous se dirigent vers la zone P et les électrons vers la zone N, où ils deviennent majoritaires. Ce déplacement des porteurs de charge génère un courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou créées par la lumière sont séparées par le champ électrique : les électrons se déplacent vers la région N, tandis que les trous se dirigent vers la région P. Ce mouvement des photoporteurs entraîne un courant de génération. La combinaison de ces deux effets donne naissance à un courant photoélectrique total IPH

Il s'agit d'un courant de porteurs minoritaires, proportionnel à l'intensité lumineuse [18]

### I.15 Différents types de cellules photovoltaïques [9]

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, qui peuvent être classées de la manière suivante :

#### I.15.1 Les cellules monocristallines :

Les cellules solaires en silicium monocristallin sont composées d'un seul cristal. Elles présentent généralement une couleur bleue uniforme

#### Avantage :

Longévité élevée ( $\pm 30$  ans).

Elles offrent des rendements élevés, variant entre 13 et 17 %.

Elles produisent plus d'électricité sur une même surface que les autres types de cellules (polycristallines, amorphes).

Elles nécessitent moins d'espace pour produire la même quantité d'énergie qu'un panneau polycristallin ou amorphe, ce qui est un avantage pour les toitures de petite taille.

C'est une technologie bien maîtrisée, avec une fiabilité prouvée sur le long terme.

### **Inconvénients :**

Ils ont un coût très élevé.

Efficacité réduite en cas de faible luminosité

Lors de la fabrication, une partie importante du silicium est perdue (découpe du lingot en fines tranches), ce qui augmente les déchets et le coût environnemental.

Une ombre partielle (branche, saleté, etc.) sur une seule cellule peut réduire considérablement la performance du panneau entier.

Cela nécessite souvent l'ajout de diodes de dérivation (bypass) pour limiter l'impact.

Bien que les cellules monocristallines soient écologiques à l'usage, leur production consomme beaucoup d'énergie (énergie grise) et nécessite des produits chimiques.



**Figure I 10:Cellule au silicium monocristallin.**

### **I.15.2 Les cellules poly-cristallines :**

Ces éléments sont composés de plusieurs cristaux et présentent un aspect mosaïque légèrement bleuté (non uniforme). Leur rendement varie entre 11 et 15%.

**Avantage :**

Un bon rendement. Toutefois inférieure à celle des cellules monocristallines

Actuellement, elles proposent un excellent équilibre entre la qualité et le prix.

Le processus de fabrication génère moins de déchets de silicium, car le lingot n'a pas besoin d'être découpé de manière aussi précise qu'en monocristallin.

Leurs performances chutent moins fortement en cas de température élevée par rapport aux monocristallins dans certains cas

**Inconvénients :**

Efficacité réduite en cas de faible luminosité

À cause du rendement plus bas, il faut plus de surface pour produire la même quantité d'électricité qu'un panneau monocristallin.

Les panneaux ont un aspect bleuté avec des motifs visibles (dû à la structure multicristalline), ce qui peut être jugé moins esthétique.



Figure I 11: Cellule au silicium poly cristalline.

**I.15.3 Les cellules amorphes :**

Le silicium est utilisé sous forme de fine couche non cristallisée, appliquée sur une plaque de verre. Ce type de cellule est souvent retrouvé dans des produits de consommation de petite taille, tels que les montres et les calculatrices

**Avantage :**

Moins cher que les autres.

Fonctionne dans des conditions de faible luminosité.

Les cellules amorphes ont une meilleure stabilité thermique : elles perdent moins de rendement en cas de forte chaleur

Les panneaux amorphes sont uniformément foncés (souvent noirs ou gris), ce qui peut être visuellement plus élégant selon les applications

**Inconvénients :**

Performance réduite.

Rendement qui diminue au fil du temps, espérance de vie limitée.

À cause de leur faible rendement, elles nécessitent beaucoup de surface pour produire la même énergie que les autres types..



Figure I 12:Cellule au silicium amorphe.

**I.15.4 : Les cellules multi-jonctions :**

Les cellules à multi-jonctions sont composées de plusieurs couches qui facilitent l'absorption de la majorité du spectre solaire. Toutefois, ces cellules ne sont pas mises sur le marché.



Figure I 13:Cellule au silicium multi jonction.

### I.15.5 : Les cellules organiques :

À un stade encore préliminaire de recherche, cette technologie innovante offre désormais la possibilité de fabriquer des cellules solaires organiques légères et flexibles sur une grande échelle tout en étant moins coûteuses à produire.

Les cellules PV organiques sont de trois types ; moléculaire, polymère et Hybride.

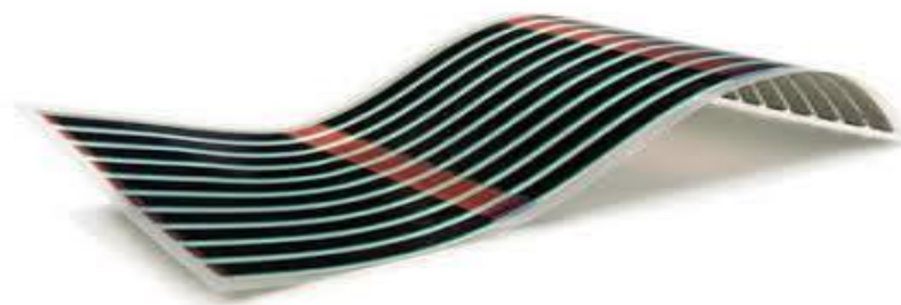


Figure I 14: Cellule au silicium amorphe.

### I.16 Module (ou panneau) photovoltaïque

En général, une cellule photovoltaïque génère moins de 2 watts avec une tension approximative de 0,5 Volt. Pour augmenter la puissance, on assemble les cellules pour constituer un module. Un ensemble de Plusieurs cellules photovoltaïques constituent un module solaire (également appelé panneau photovoltaïque), et en associant ces modules en série et/ou en parallèle, on peut créer un champ photovoltaïque.

Un panneau solaire est généralement constitué d'un assemblage de 36 cellules disposées en série, couvertes par une couche de verre et de plastique qui les protège contre l'humidité. On procède ensuite à l'ajout d'un cadre et d'une boîte de connexion électrique à l'ensemble. L'évolution d'un module vers une chaîne (string) implique l'installation de diodes de protection : l'une en série pour empêcher les courants inverses, et l'autre en parallèle, appelée diode by-pass. Cette dernière n'est activée que lors d'un déséquilibre dans un groupe de cellules afin de restreindre la tension inverse sur ce groupe et réduire la perte de production associée. [5]

### I.17 : Champ photovoltaïque :

Pour obtenir la tension souhaitée pour une charge, les panneaux sont disposés en série, formant ainsi un ensemble de modules, ou « string ». Ces ensembles sont ensuite connectés en parallèle pour constituer un champ photovoltaïque (champ PV). [15]

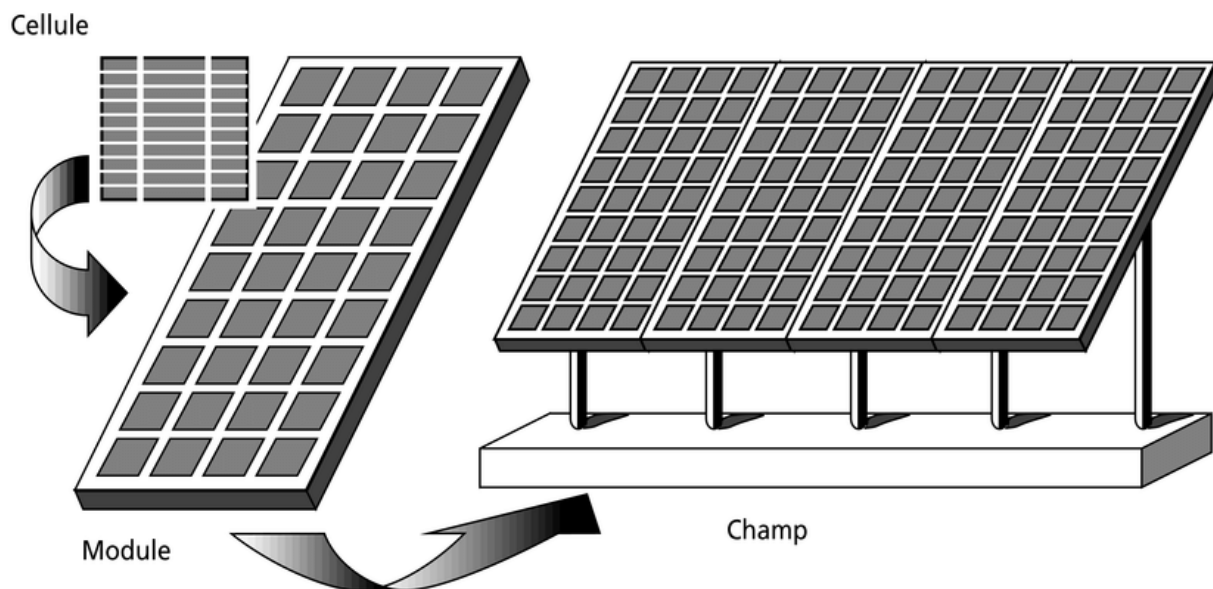


Figure I 15:Module et champ photovoltaïque.

### I.18 Avantages du système photovoltaïque :

Grâce à ses nombreux bénéfices tant écologiques qu'économiques, et à sa fiabilité reconnue, l'énergie photovoltaïque se positionne comme une source essentielle de production d'électricité.

- Son énergie est gratuite.
- L'énergie solaire photovoltaïque est silencieuse, sans émissions nocives ni gaz polluants.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement sûrs et fiables.
- Les modules photovoltaïques sont recyclables.
- L'énergie solaire photovoltaïque nécessite très peu d'entretien.
- La source d'énergie solaire permet d'alimenter en électricité les zones rurales les plus isolées.
- La source énergétique solaire peut être intégrée harmonieusement à l'architecture des bâtiments
- La source énergétique solaire constitue un levier important pour la création de milliers d'emplois.
- La source énergétique solaire renforce la sécurité de l'approvisionnement énergétique. [19,20].

### **I.19 Les inconvénient du système photovoltaïque :**

- La production du module photovoltaïque repose sur des technologies avancées et nécessite des investissements considérables.
- Le rendement réel de conversion d'un module photovoltaïque est relativement faible, se situant entre 10 et 15 %, avec une limite théorique de 28 % pour une cellule
- Limites de charge et de décharge pour des batteries : de 30% à 80 % [21].

### **I.20 Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque:**

L'énergie solaire présente l'inconvénient majeur de ne pas être disponible en continu, ce qui rend le stockage indispensable pour assurer une alimentation stable. Plusieurs technologies permettent de conserver cette énergie : réservoirs hydrauliques, production d'hydrogène, volants d'inertie, batteries électrochimiques (plomb, lithium) ou super-condensateurs. Ces systèmes de stockage sont particulièrement cruciaux pour les sites isolés, où ils garantissent l'autonomie en accumulant l'énergie excédentaire et en la restituant lorsque la production devient insuffisante. Par ailleurs, le stockage joue un rôle clé dans la stabilisation du réseau électrique, en facilitant la gestion de l'équilibre entre production et consommation, en améliorant les performances des infrastructures de transport et de distribution, et en augmentant le rendement des unités de production tout en réduisant les rejets polluants. [22].

#### **I.20.1 Les batteries :**

Les batteries représentent l'un des moyens les plus répandus de stockage électrochimique à petite échelle. Elles reposent sur des technologies éprouvées et accessibles, et leur fonctionnement est basé sur des réactions d'oxydoréduction similaires à celles observées dans les piles. Lors de la charge, l'énergie électrique est stockée par le biais de transformations chimiques réversibles, et elle peut être restituée au moment de la décharge avec un rendement pouvant atteindre environ 85 %, selon le type d'accumulateur utilisé. Sur le plan structurel, une batterie se compose de deux électrodes — l'anode et la cathode — chacune immergée dans un électrolyte ionique. Lorsqu'un courant de charge est appliqué, une réaction d'oxydation se produit à la cathode, libérant des électrons. Ces électrons traversent le circuit externe, générant le courant électrique. Simultanément, ils sont captés au niveau de l'anode, où ils déclenchent une réaction de réduction des espèces chimiques présentes. Ce mécanisme réversible constitue le principe fondamental du fonctionnement des batteries rechargeables.

Les ions générés par les réactions d'oxydation et de réduction, issues des deux demi-réactions électrochimiques, se retrouvent dans les solutions ioniques respectives des électrodes. Ces solutions sont séparées par un électrolyte, une solution ionique qui ne participe pas directement aux réactions électrochimiques. En fonction des besoins, les ions positifs et négatifs migrent respectivement vers les solutions de l'anode et de la cathode, garantissant

ainsi l'équilibre électrolytique et la neutralité électrique des deux solutions. Lors de la décharge, un courant inverse provoque les réactions d'oxydation et de réduction inversées, entraînant le flux d'électrons de l'anode vers la cathode. Ce processus engendre une diminution des concentrations ioniques dans les solutions, tandis que les électrodes se reconstruisent, et l'électrolyte se régénère en conséquence. Ce principe électrochimique a donné lieu au développement, au cours du dernier siècle, de diverses technologies de batteries, telles que les accumulateurs au plomb, au nickel-cadmium, au nickel-hydrure métallique et au lithium.

### **I.20.2 Les super-condensateurs :**

Solutions alternatives ou complémentaires aux batteries actuelles, Depuis deux décennies, les supraconducteurs sont envisagés comme des dispositifs de stockage d'énergie, comparables à des condensateurs de très grande capacité. À l'instar des batteries, leur fonctionnement repose sur un électrolyte placé entre deux électrodes constituées d'un matériau poreux, tel que le charbon actif, afin d'augmenter considérablement la surface de contact disponible. Chaque électrode est reliée à un collecteur électronique qui permet la circulation du courant, selon qu'il s'agisse d'un processus de charge ou de décharge. Lorsqu'un déséquilibre d'électrons apparaît – un déficit sur une électrode et un excès sur l'autre – les ions de l'électrolyte, positifs ou négatifs selon le cas, se regroupent à proximité de l'électrode opposée, formant ainsi une double couche électrochimique stable. Cette configuration génère une différence de potentiel dans l'électrolyte. La charge est considérée comme complète lorsque ce dernier atteint sa limite de dissociation. Par conséquent, pour optimiser la capacité de stockage, les électrodes doivent offrir une surface suffisamment grande pour accueillir un maximum d'ions.

### **I.20.3 Les piles à combustible :**

La pile à combustible est présentée comme une solution prometteuse de stockage énergétique pour les années à venir. Elle fonctionne en stockant un combustible, qui réagit avec le dihydrogène dans une réaction d'oxydoréduction, suivant un principe similaire à celui des batteries. Le dihydrogène joue ici le rôle de réducteur, et en se combinant avec le dioxygène, il génère de l'eau comme produit final. Ce gaz peut être obtenu à partir du méthane ou encore par électrolyse de l'eau, un procédé qui libère du dioxygène. Dans ce dernier cas, l'utilisation de l'hydrogène constitue une source d'énergie entièrement propre.

Une pile à combustible alimentée par du dihydrogène est équipée de cathodes poreuses, généralement fabriquées en graphite et imprégnées de platine, un catalyseur indispensable à l'oxydation de l'hydrogène. Ce type de pile peut être intégré dans des systèmes de puissance faible à moyenne, qu'il s'agisse d'alimentations autonomes ou de véhicules électriques. Selon

la technologie employée, son rendement énergétique se situe entre 30 % et 60 %, avec une énergie spécifique avoisinant les 30 kWh par kilogramme.

#### **I.20.4 Les volants d'inertie :**

Le volant d'inertie représente la dernière méthode de stockage étudiée, bien qu'il repose sur un principe connu depuis des millénaires. Il s'agit d'un cylindre massif fixé à l'extrémité d'un dispositif rotatif. Lorsqu'il est nécessaire de stocker de l'énergie électrique, le système fonctionne comme un moteur, faisant tourner le volant pour transformer l'électricité en énergie cinétique. À l'inverse, pour restituer cette énergie, le dispositif agit comme une génératrice en ralentissant la rotation du volant, ce qui génère un courant électrique. Les dimensions du volant – notamment son rayon et son épaisseur – varient en fonction de son inertie ( $J_{vi}$ ), ce qui détermine les niveaux d'énergie et de puissance qu'il peut atteindre.

Offrant un bon rendement avoisinant les 80 %, ainsi qu'une puissance spécifique élevée, cette technologie se distingue par sa propreté et son efficacité. Toutefois, son énergie spécifique reste limitée, de l'ordre de quelques dizaines de Wh/kg, tandis que sa puissance spécifique peut atteindre plusieurs kW/kg. Ces caractéristiques la rendent comparable aux super condensateurs et adaptée à des applications similaires. Son principal inconvénient réside dans le risque associé à la rotation à grande vitesse du volant, ce qui impose des mesures de sécurité strictes. Bien qu'il demande peu de maintenance, ce système requiert une conception sécurisée pour protéger les utilisateurs et peut être volumineux, ce qui le rend moins adapté à un usage domestique ou individuel

#### **I.20.5 Stockage hybride :**

L'hybridation consiste à intégrer plusieurs sources d'énergie et dispositifs de stockage au sein d'un même système afin d'optimiser la production et la gestion énergétique. Ce concept s'est particulièrement développé avec l'essor des véhicules électriques dans l'industrie automobile. En effet, les fluctuations rapides de la demande énergétique – avec des pics de puissance bien supérieurs à la puissance moyenne – entraînent des pertes importantes et obligent à surdimensionner les systèmes de conversion, ce qui alourdit les coûts et diminue l'efficacité globale. L'ajout d'un système de stockage intermédiaire permet d'amortir ces variations, d'optimiser l'utilisation de l'énergie disponible et de limiter les impacts négatifs liés aux pics de charge ou de production.

**I.21 Conclusion :**

Ce chapitre a été dédié aux fondamentaux du développement de l'énergie solaire. Il aborde en particulier les concepts essentiels concernant le potentiel solaire, le principe de conversion par photovoltaïque, les cellules photovoltaïques, ainsi que les différentes méthodes de stockage utilisées dans ce domaine.

# **Chapitre II :**

## **Les convertisseurs**

### **DC-DC et la commande**

#### **MPPT.**

## II.1 INTRODUCTION :

Les panneaux photovoltaïques sont conçus pour délivrer une puissance maximale, mais les variations des conditions environnementales, telles que l'ensoleillement et la température, rendent cette puissance fluctuante. Pour garantir une exploitation optimale de l'énergie solaire, il est essentiel d'ajuster en temps réel la charge appliquée au générateur photovoltaïque. Cette adaptation est assurée par l'intégration d'un convertisseur continu-continu (DC-DC), appelé hacheur, placé entre le générateur et la charge.

Le fonctionnement de ce convertisseur est piloté par une technique de suivi du point de puissance maximale, connue sous le nom de **Maximum Power Point Tracking (MPPT)**. Ce chapitre a pour objectif d'étudier les différents types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques, ainsi que quelques méthodes de commande MPPT permettant d'en optimiser le rendement.

## II.2 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les hacheurs, ou convertisseurs continu-continu (DC-DC), permettent de réguler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu.

Grâce à une conception simple et une commande aisée, ces dispositifs offrent un rendement énergétique élevé [22].

Un hacheur est généralement constitué de composants passifs tels que des condensateurs et des inductances, ainsi que de commutateurs électroniques.

Ces éléments consomment très peu de puissance active, ce qui contribue à l'efficacité globale du système.

Dans les systèmes photovoltaïques, le rôle principal du convertisseur DC-DC est d'assurer l'adaptation entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge, de manière à maximiser le transfert de puissance.



Figure II 1:Schéma de principe d'un convertisseur.

### II.3 Principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC :

Le principe de fonctionnement d'un convertisseur, ou hacheur, repose sur l'établissement puis l'interruption périodique de la connexion entre la source et la charge. Cela se fait au moyen de la commutation cyclique (ouverture et fermeture) d'un interrupteur unidirectionnel. Ce procédé permet d'obtenir une tension de sortie continue, dont la valeur peut être ajustée en fonction des besoins [23].

### II.4 Domaine d'utilisation des hacheurs :

L'un des principaux domaines d'application des hacheurs est la variation de vitesse des moteurs à courant continu (MCC), Ils sont largement utilisés dans les systèmes de traction de puissance moyenne, comme ceux des métros. À titre d'exemple, la première génération de TGV était équipée d'un ensemble combinant hacheurs et moteurs à courant continu. On retrouve également ces convertisseurs dans de nombreux équipements exploitant les énergies renouvelables, notamment les systèmes utilisant l'énergie solaire ou éolienne. [24]

### II.5 Différents types d'hacheurs :

On distingue trois types de convertisseur statique : [25]

#### II.5.1 Hacheur dévolteur ou abaisseur (Buck) :

On parle de **hacheur dévolteur** lorsque l'interrupteur est placé en série avec la charge. Ce type de convertisseur est utilisé pour abaisser une tension continue, c'est-à-dire qu'il convertit une tension d'entrée continue en une tension de sortie continue de valeur inférieure, Il est particulièrement adapté aux applications nécessitant des tensions basses. Dans les systèmes photovoltaïques, ce type de convertisseur peut être utilisé pour adapter la source à la charge, notamment lorsque le point de fonctionnement en couplage direct s'éloigne du point de puissance maximale (MPP).

L'appareil de conversion Buck est généralement utilisé en tant que chargeur de batteries.

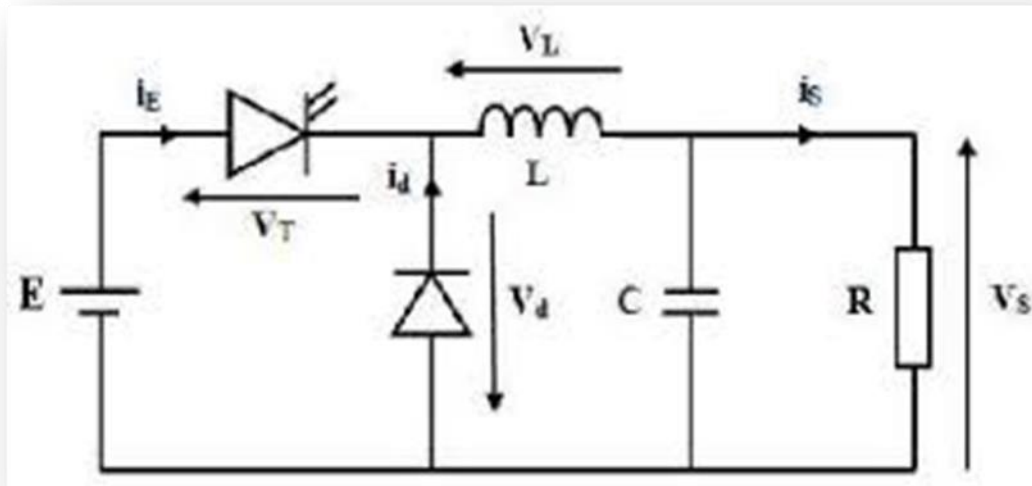


Figure II 2:Hacheur dévolteur ou abaisseur.

### II.5.2 Hacheur survolteur ou élévateur (boost) :

On parle de **hacheur survolteur** lorsque l'interrupteur est placé en parallèle avec la charge. Ce type de convertisseur a pour fonction d'élever une tension continue d'entrée vers une tension de sortie continue de valeur supérieure.

Il est particulièrement utile dans les applications où une tension plus élevée est requise. Dans le contexte des systèmes photovoltaïques, ce type de hacheur peut être utilisé en amont d'un onduleur afin d'injecter l'énergie produite dans le réseau électrique.

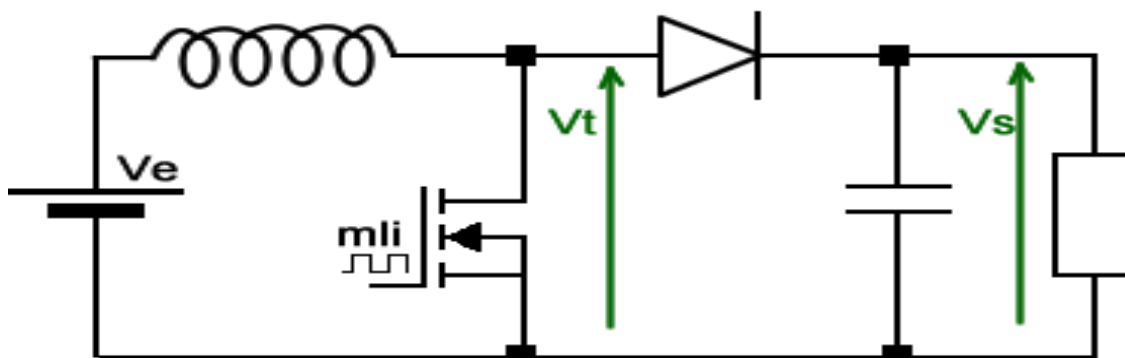


Figure II 3:Hacheur survolteur ou élévateur.

### II.5.3 Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost) :

Le **hacheur abaisseur-élévateur** (ou **Buck-Boost**) combine les fonctions des hacheurs dévolteur et survolteur, permettant ainsi d'augmenter ou de diminuer la tension en sortie selon les besoins. Il est particulièrement utile dans les systèmes photovoltaïques où la tension d'entrée peut varier autour de la valeur souhaitée.

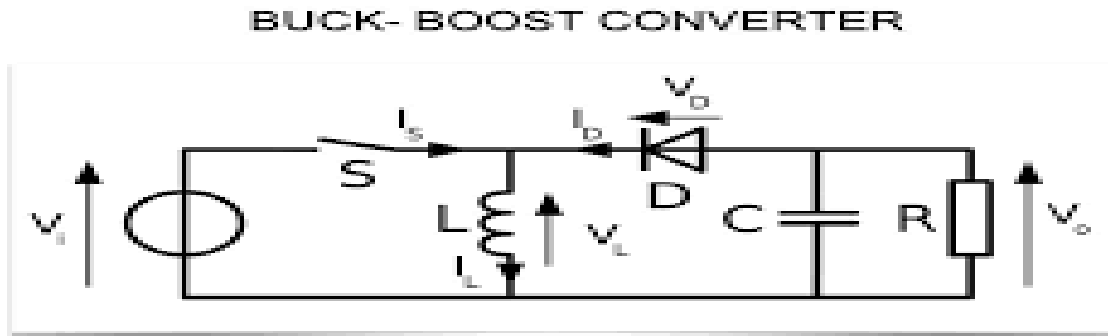


Figure II 4:Hacheur abaisseur-élevateur.

## II.6 : Hacheur survolteur ou élevéteur (boost) :

Le **convertisseur Boost** est particulièrement bien adapté aux systèmes photovoltaïques associés à un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT), en raison des nombreux avantages qu'il offre. [26]

### II.6.1 Les avantage : [27]

- Le convertisseur Boost fonctionne en mode courant continu, tirant un maximum de puissance possible à partir du générateur photovoltaïque.
- Ce convertisseur présente l'avantage de limiter l'ondulation du courant d'entrée grâce à l'inductance LLL.
- Il peut opérer même avec une faible tension d'entrée, ce qui permet de récupérer l'énergie disponible pendant les périodes de faible ensoleillement.
- En règle générale, le convertisseur Boost est utilisé pour augmenter la tension de sortie, tandis que le convertisseur Buck est employé pour réduire la tension de sortie.
- Il est largement utilisé pour adapter la tension des panneaux solaires à celle exigée par la charge ou l'onduleur, en particulier lorsqu'il est associé à une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).
- Le circuit est relativement simple à concevoir et à contrôler, avec peu de composants : une diode, une bobine, un interrupteur (MOSFET) et un condensateur.

### II.6.2 Applications :

Un convertisseur **Boost** est utilisé lorsqu'il est nécessaire d'augmenter la tension d'une source en courant continu. Dans les systèmes alimentés par des batteries, plusieurs accumulateurs sont souvent connectés en série pour atteindre un niveau de tension adéquat. Cependant, en

raison de la limitation de l'espace disponible, il n'est pas toujours possible d'ajouter suffisamment d'éléments. Le convertisseur Boost permet alors d'augmenter la tension fournie par les panneaux solaires ou les batteries, réduisant ainsi le nombre d'accumulateurs nécessaires pour obtenir la tension souhaitée.

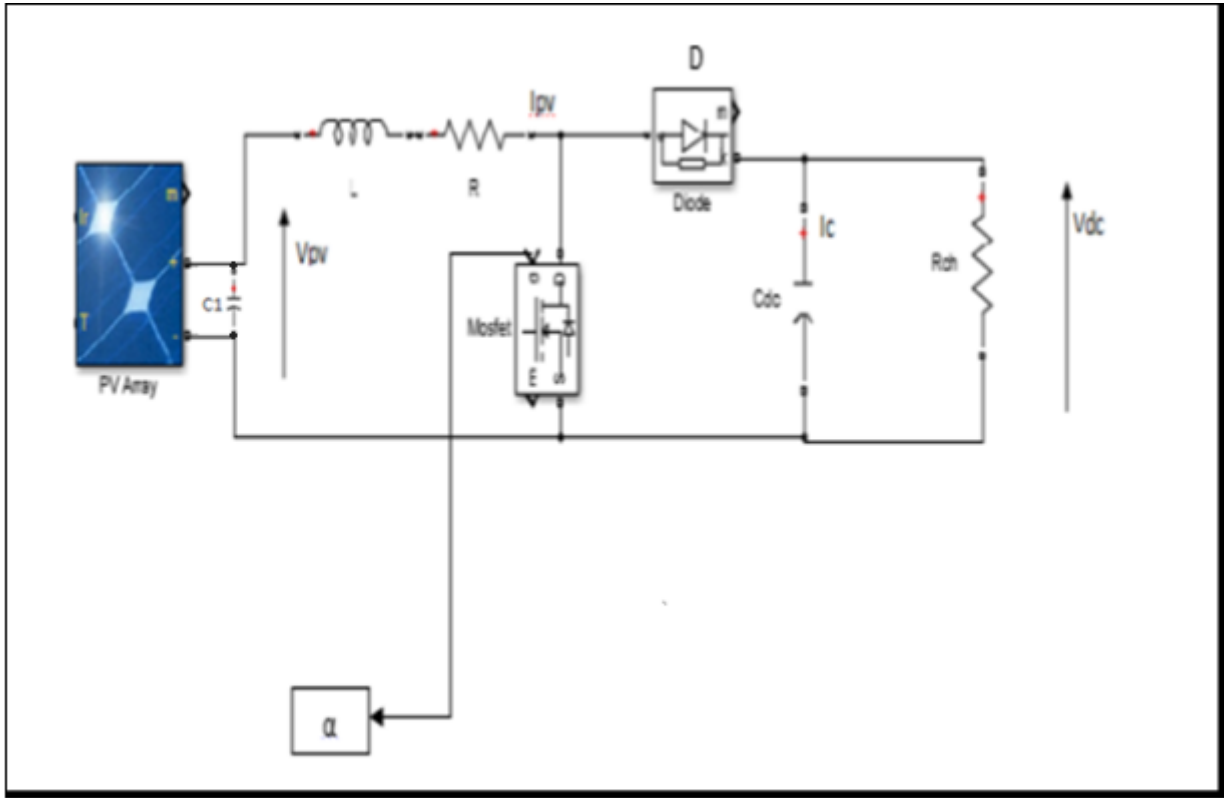


Figure II 5: Système photovoltaïque suivi par un hacheur de type Boost.

Il est composé d'un semi-conducteur de puissance (transistor MOSFET), d'une diode d'anti retour " D" et d'un condensateur de stockage  $C_{dc}$ . Le fonctionnement dépend du rapport cyclique  $\alpha$ . or, il peut être représenté sous l'équation d'état suivante :  $\dot{x} = Ax + Bu$

Où,  $x$  est le vecteur d'état définit par :

$$X = [I_{pv} \ V_{pv}]^T$$

D'où  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  variable d'état.

Et,  $u$  est l'entrée de commande :  $U = V_{pv}$

En termes de modélisation, on distingue deux intervalles :

**a- Le première s'étale du  $[0 \div \alpha T_e]$**

Où,  $T_e$  est la période d'échantillonnage. Dans cet intervalle, le semi-conducteur "TR" est non bloqué (passant) et la diode est bloquée. Cela entraine l'augmentation du courant dans

l'inductance "L" et par conséquent le stockage de l'énergie durant cet intervalle, la charge est déconnectée. D'où, le schéma de principe représenté par la figure 2.6

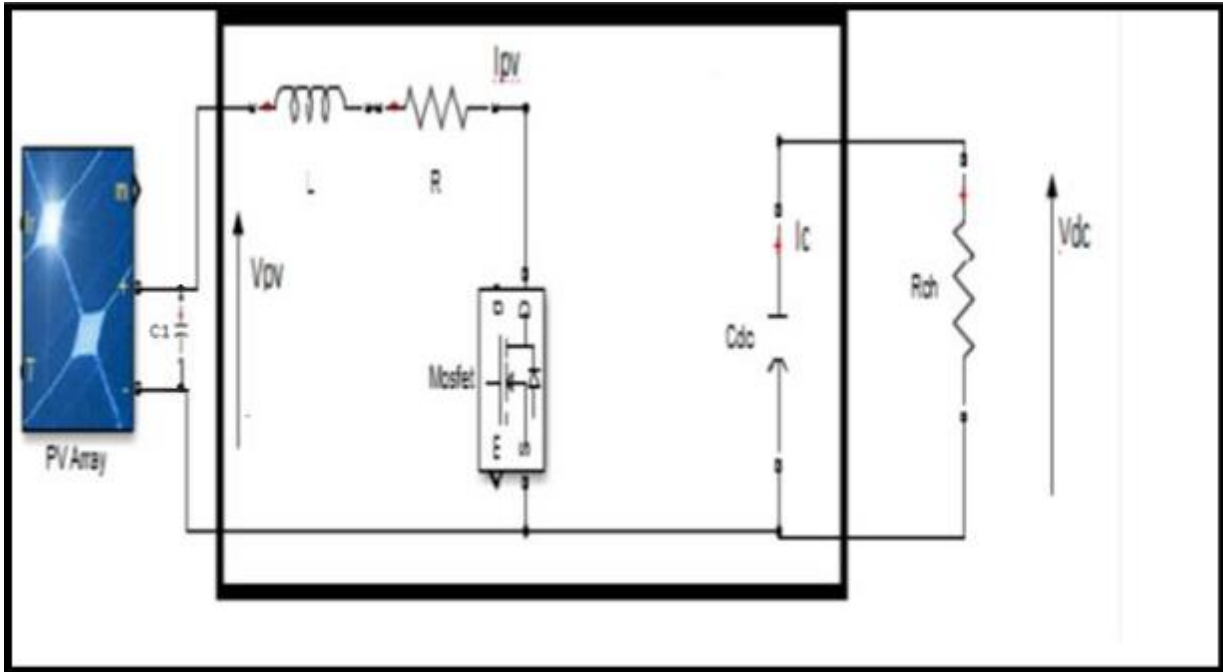


Figure II 6: Convertisseur Boost durant l'état " ON".

Notons que  $R_{ch}$  est la résistance de la charge. Elle est identifiée par :

$$R_{ch} = \frac{V_{dc}}{I_{ch}}$$

$$\begin{cases} V_{pv} - L \frac{dI_{pv}}{dt} - R \cdot I_{pv} \\ V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{ch} dt \end{cases}$$

D'où sous forme d'état, en posant que :

$$X_1 = I_{pv} \quad \text{Et} \quad X_2 = V_{dc}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{ch} C_{dc}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} V_{pv}$$

$$X = A_1 X + B_1 V_{pv}$$

$$Y = D_1 X$$

**b- Le second intervalle  $[\alpha T_e \div T_e]$  :**

Dans cette période de fonctionnement, le transistor bloquée (non passant). Par contre le diode est passante, cela conduit au circuit équivalent suivant :

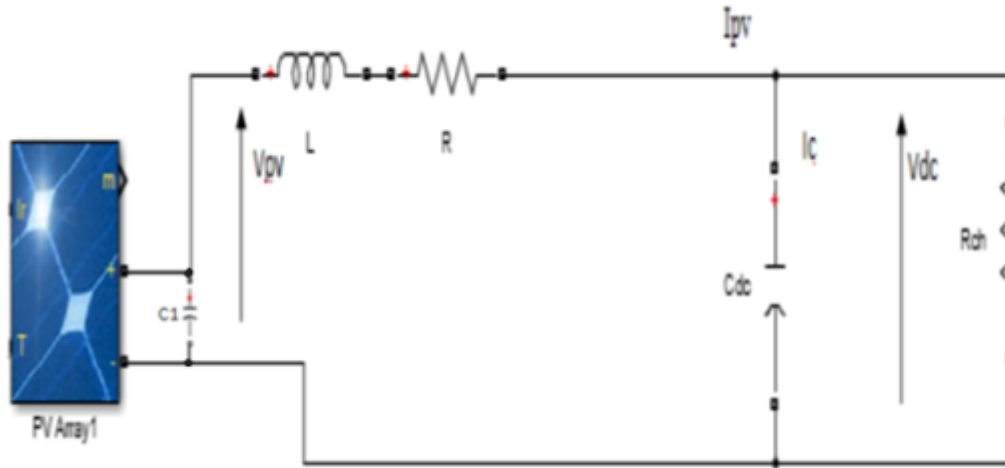


Figure II 7: Convertisseur Boost durant l'état "OFF".

De cette figure, on déduit les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{pv} - L \frac{dI_{pv}}{dt} - R \cdot I_{pv} - V_{dc} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{pv} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \end{cases}$$

Par conséquent

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix}' = \begin{pmatrix} \frac{-R}{L} & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C_{dc}} & \frac{-1}{R_{ch} C_{dc}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} X' = A_2 X + B_2 V_{pv} \\ y = D_2 X \end{cases}$$

En considérant, le développement précédent, on représente le modèle globale correspondent aux deux (2) intervalles  $[0 \div T_e]$  en tenant compte du rapport cyclique ( $\alpha$ ).

$$\begin{cases} X' = (A_1 X + B_1 V_{pv}) \alpha + (A_2 X + B_2 V_{pv})(1-\alpha) \\ V_{dc} = D_1 \alpha + D_2 (1-\alpha) X \end{cases}$$

Finalement, on a :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \frac{1-\alpha}{L} X_2 + \frac{1}{L} V_{pv} \\ \dot{X}_2 = \frac{1-\alpha}{L} X_1 - \frac{1}{R_{ch} C_{dc}} X_2 \end{cases}$$

$I_{pv}$  : Courant produit par le générateur photovoltaïque (GPV)

$V_{pv}$  : Tension en sortie du générateur photovoltaïque

$X$ : Vecteur d'état du système, défini par :

$$X = [I_{pv}, V_{pv}]^T \quad X = [I_{\{pv\}}, V_{\{pv\}}]^T \quad X = [I_{pv}, V_{pv}]^T$$

$U$  : Entrée de commande, correspondant ici à la tension PV :  $u = V_{pv} u = V_{\{pv\}} u = V_{pv}$

$A$  : Rapport cyclique de la commande PWM (entre 0 et 1)

$T_e$  : Période d'échantillonnage ou période de découpage

$C_{dc}$  : Capacité du condensateur de filtrage en sortie du convertisseur

$R_{ch}$  ; Résistance équivalente de la charge électrique connectée au système

$X_1, X_2$ : Variables d'état scalaires :

$$X_1 = I_{pv} \quad X_2 = V_{pv} \quad X_1 = I_{\{pv\}} \quad X_2 = V_{\{pv\}}$$

$\dot{X}$  : Dérivée temporelle du vecteur d'état (variation du système au cours du temps)

.

$A_1, A_2$  : Matrices d'état correspondant respectivement aux phases ON et OFF du MOSFET

$B_1, B_2$  : Matrices d'entrée associées à chaque phase de fonctionnement

$Y$  : Sortie du système (souvent la tension  $V_{dc}$  délivrée à la charge)

:

## II.7 La commande MPPT :

Il existe des lois de commande spécifiques permettant à des dispositifs de fonctionner à des points optimaux de leurs caractéristiques, sans que ces points soient nécessairement connus à l'avance, ni même que l'on puisse anticiper les moments où ces points changent ou les raisons de ces changements.

Dans le cas des sources d'énergie, ces points optimaux correspondent souvent aux **points de puissance maximale**. Cette approche est généralement désignée dans la littérature sous le terme de **Recherche du Point de Puissance Maximum** ou **Maximum Power Point Tracking (MPPT)** en anglais. Le principe de ces commandes est de localiser en temps réel le **point de puissance maximale (PPM)** tout en garantissant une adaptation parfaite entre le générateur et sa charge, afin d'assurer le transfert de la puissance maximale disponible [28].

### II.8 Principe de La commande MPPT :

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT), associé à un étage d'adaptation intermédiaire, permet d'exploiter un générateur photovoltaïque (GPV) de manière optimale. Quel que soit le contexte climatique — en particulier les variations d'ensoleillement et de température — la commande du convertisseur ajuste en permanence le point de fonctionnement du système pour qu'il coïncide avec le point de puissance maximale, défini par la tension  $V_{PPMV}$  et le courant  $I_{PPMI}$ . Ainsi, la chaîne de conversion photovoltaïque est continuellement optimisée grâce à un convertisseur statique (CS) piloté par l'algorithme MPPT. Ce principe de fonctionnement est illustré dans le schéma de la Figure II.8 [9].

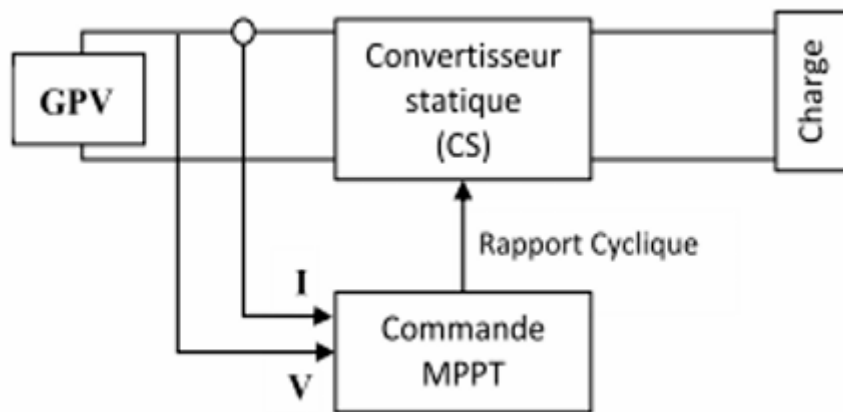


Figure II 8:Etage d'adaptation.

La commande MPPT agit en modulant le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique adapté, dans le but d'extraire la puissance maximale que peut fournir le générateur photovoltaïque (GPV). Bien que les algorithmes MPPT puissent varier en complexité, leur principe repose généralement sur l'ajustement du rapport cyclique en fonction des grandeurs d'entrée du GPV, telles que la tension  $V$ , le courant  $I$ , et par conséquent la puissance électrique. L'objectif est de faire converger le point de fonctionnement du système vers le point de puissance maximale (MPP) [9] [14].

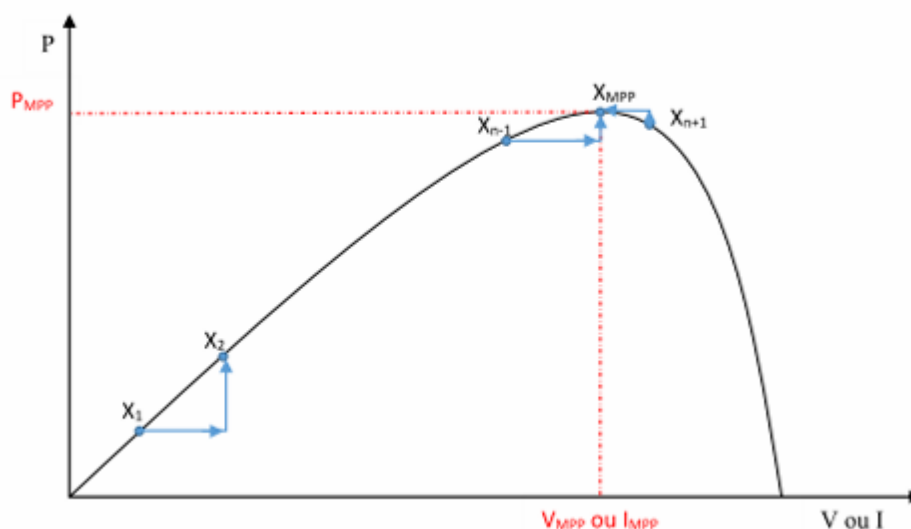


Figure II 9: Principe de la commande MPP [14].

## II.9 Classification Des Commandes MPPT :

La classification peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées: méthodes directes et indirectes [10].

### II.9.1 MPPT indirecte :

Certains types de commandes MPPT exploitent la relation existante entre des grandeurs facilement mesurables, comme le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) ou la tension à vide ( $V_{oc}$ ), et la position approximative du point de puissance maximale (MPP). D'autres approches reposent sur une estimation du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque (GPV) à partir d'un modèle paramétrique préalablement défini. Il existe également des méthodes de suivi de la tension optimale qui ne tiennent compte que des variations de température **des cellules**, mesurées par un capteur. Simples à mettre en œuvre, ces techniques sont adaptées à des **systèmes à faible coût et précision modérée**, notamment dans des zones où les conditions climatiques évoluent peu. Parmi ces méthodes, on peut citer la **méthode de la tension de circuit ouvert**, la **méthode du court-circuit**, et d'autres variantes similaires [14].

### II.9.2 MPPT Directe :

Les méthodes directes de MPPT reposent sur les mesures de tension et de courant délivrées par les panneaux photovoltaïques. Leur algorithme se base sur les variations de ces grandeurs pour localiser le point de puissance maximale (MPP). La détermination de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque (PV) est essentielle dans ce processus, ce qui

nécessite de mesurer à la fois la tension et le courant, puis de calculer leur produit. Lorsque la puissance mesurée augmente, l'algorithme conserve la même direction de recherche pour l'itération suivante ; dans le cas contraire, la direction est inversée.

Par ailleurs, certains algorithmes introduisent de petites perturbations sinusoïdales dans la fréquence de découpage du convertisseur. En analysant les composantes alternative et continue de la tension du GPV, ils permettent de positionner le point de fonctionnement au plus près du MPP. Ces méthodes offrent l'avantage d'une grande précision et d'une réaction rapide face aux variations d'ensoleillement. Parmi les techniques les plus répandues, on retrouve la méthode de la différentiation, la méthode Perturb and Observe (P&O), et la méthode de l'incrément de conductance (InC) [11].

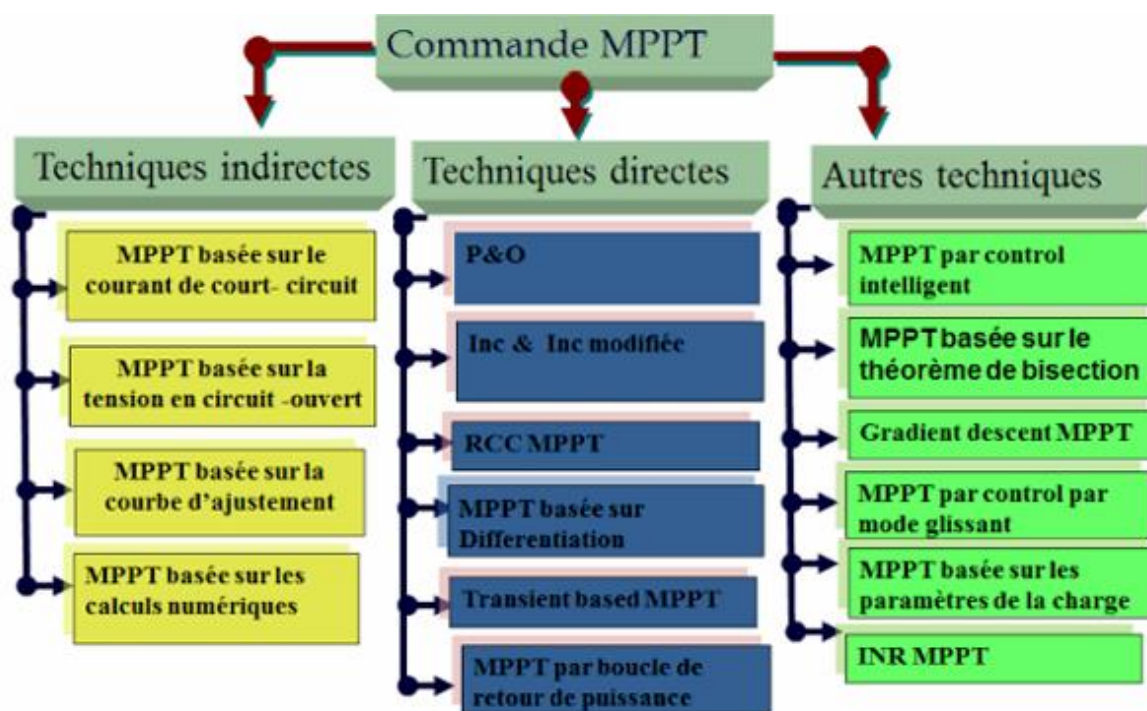


Figure II 10: Organigramme de classifications des commandes MPPT.

### II.10 Les algorithmes MPPT :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT, dont les performances varient selon les caractéristiques exploitées du générateur photovoltaïque (GPV). La synthèse des principales méthodes de recherche du point de puissance maximale (PPM), présentée dans ce chapitre, a permis d'identifier les approches existantes ainsi que leurs limites. Cette analyse

a constitué une base théorique solide pour orienter nos travaux de simulation exposés dans le chapitre suivant [14].

### **II.10.1 Méthodes à contre réaction de tension :**

Ce type de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux photovoltaïques par comparaison avec une tension de référence. La différence entre ces deux tensions génère un signal d'erreur, qui est utilisé pour ajuster le rapport cyclique de la commande PWM, dans le but de réduire cette erreur à zéro.

En fonction de la nature de la tension de référence qu'elle soit fixe, variable, interne ou issue d'une source externe on distingue trois grandes catégories de méthodes [14] :

- ❖ Méthode à tension de référence fixe.
- ❖ Méthode à tension de référence proportionnelle à la tension à vide (open-circuit voltage).
- ❖ Méthode à tension de référence basée sur une cellule pilote.

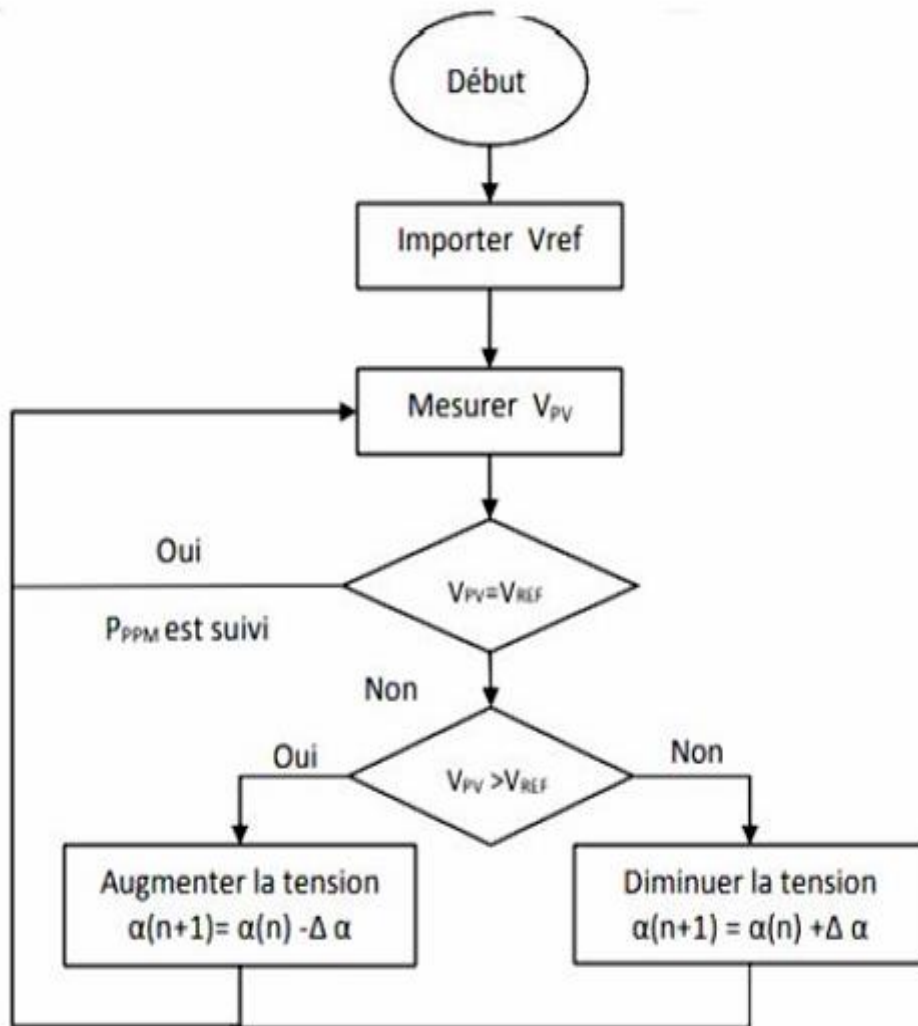


Figure II 11:Algorithme de circuit ouvert [17].

### II.10.2 Méthodes a contre réaction de courant :

Cette méthode repose uniquement sur la **mesure du courant** pour déterminer le point de fonctionnement actuel du système. Elle permet d'estimer la **valeur optimale du courant** à laquelle le panneau photovoltaïque doit opérer afin d'extraire la puissance maximale [14] [17].

On distingue principalement deux approches basées sur ce principe :

- Méthode à courant de référence proportionnel au courant de court-circuit
- Méthode de maximisation du courant de sortie

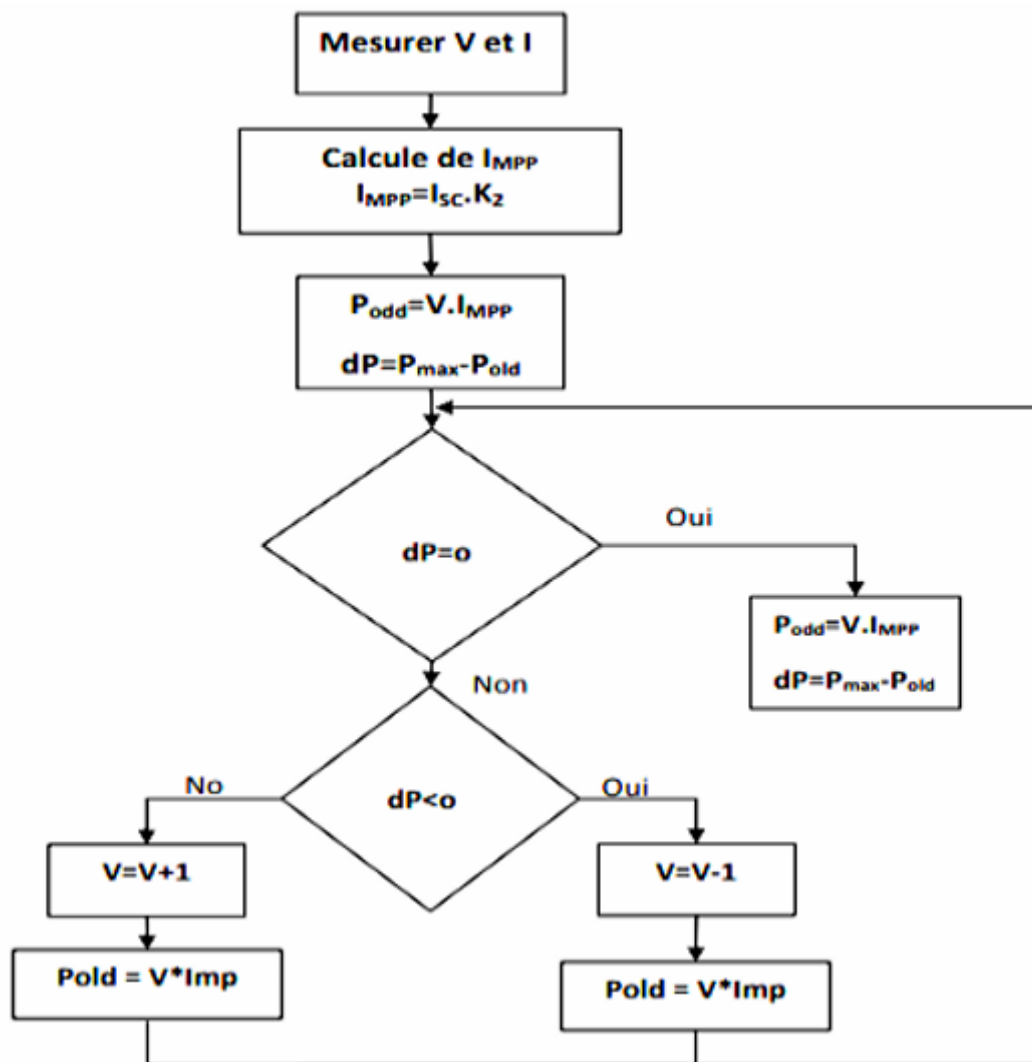


figure II 12::Algorithme de court-circuit [17].

### II.10.3 Méthodes à contre réaction de puissance :

Ces méthodes reposent sur des **algorithmes de recherche itérative** visant à localiser le point de fonctionnement optimal du panneau, permettant ainsi de générer en continu la puissance maximale, sans interruption du système.

La puissance instantanée du générateur photovoltaïque est calculée de manière simple, par le produit de la tension et du courant :  $P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$ . Contrairement à d'autres approches, ces méthodes ne s'appuient ni sur des valeurs de référence prédéfinies ni sur des paramètres spécifiques du système. Elles sont entièrement basées sur la **maximisation dynamique de la puissance générée**. Concrètement, à chaque itération, une direction de recherche est choisie ; si la puissance augmente, cette direction est conservée. En revanche, si la puissance diminue, la direction est inversée [19].

- ❖ Méthode de perturbation et observation (P&O).

- ❖ Méthode de conductance incrémentale (InC).
- ❖ Méthode de Hill Climbing.

### **II.11 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons tout d'abord présenté une étude détaillée des convertisseurs statiques DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Les trois principaux types de hacheurs ont été abordés, à savoir ceux opérant en mode abaisseur (Buck), élévateur (Boost), ou en mode mixte (Buck-Boost).

La seconde partie a été consacrée à la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), une technique essentielle pour assurer l'extraction maximale de la puissance disponible du générateur photovoltaïque, quelles que soient les conditions de fonctionnement.

# **Chapitre III :**

## **Simulation et évaluation des**

### **résultats.**

### III.1 Introduction :

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système.

La simulation permet de tester un système dans un environnement aux conditions maîtrisées, tout en assurant un suivi précis de ses performances. Elle joue un rôle essentiel en établissant un lien entre l'analyse théorique et la mise en œuvre pratique d'un prototype. Grâce à la flexibilité qu'offre cette étape, il est possible d'apporter aisément des modifications à la conception et d'examiner un large éventail de scénarios de fonctionnement, ce qui facilite l'identification d'une solution optimale.

Matlab/Simulink est un environnement de simulation doté d'une interface graphique intuitive, permettant la modélisation de systèmes sous forme de schémas blocs. Il permet également la création de modèles hiérarchiques, facilitant ainsi l'analyse du système à différents niveaux de détail.

### III.2 simulation et résultat :

#### III.2.1 Simulation de convertisseur de puissance survolteur boost

La figure suivante représente un convertisseur boost (hacheur) utilisé pour connecter un système photovoltaïque, avec une tension d'entrée de 110 V et une tension de sortie de 220 V. Ce type de convertisseur permet d'élever la tension générée par les panneaux solaires afin de l'adapter aux exigences du système, garantissant ainsi une utilisation optimale de l'énergie produite.

Pour la simulation du convertisseur nous utilisons :

- Une source de tension de 110 V continu comme tension d'entrée du convertisseur DC-DC.
- Les paramètres ( $L=5e-3$  H ;  $C=3300e-6$  F.)

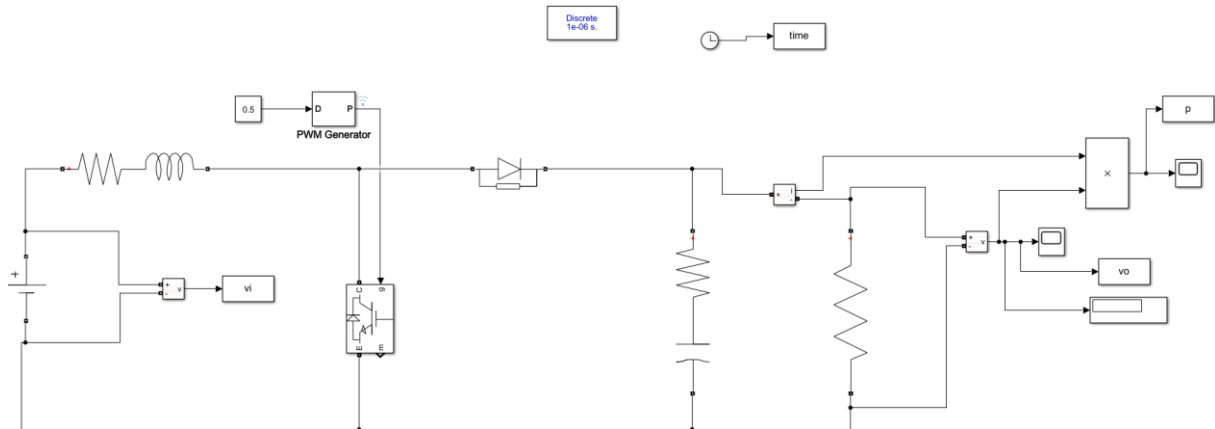


Figure III 1:Schéma de simulation du hacheur survolteur BOOST.

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (27). Cette figure représente la tension de sortie d’hacheur survolteur. Ces résultats montrent que la tension de sortie d’hacheur survolteur est supérieure à celle d’entrée. Donc le hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

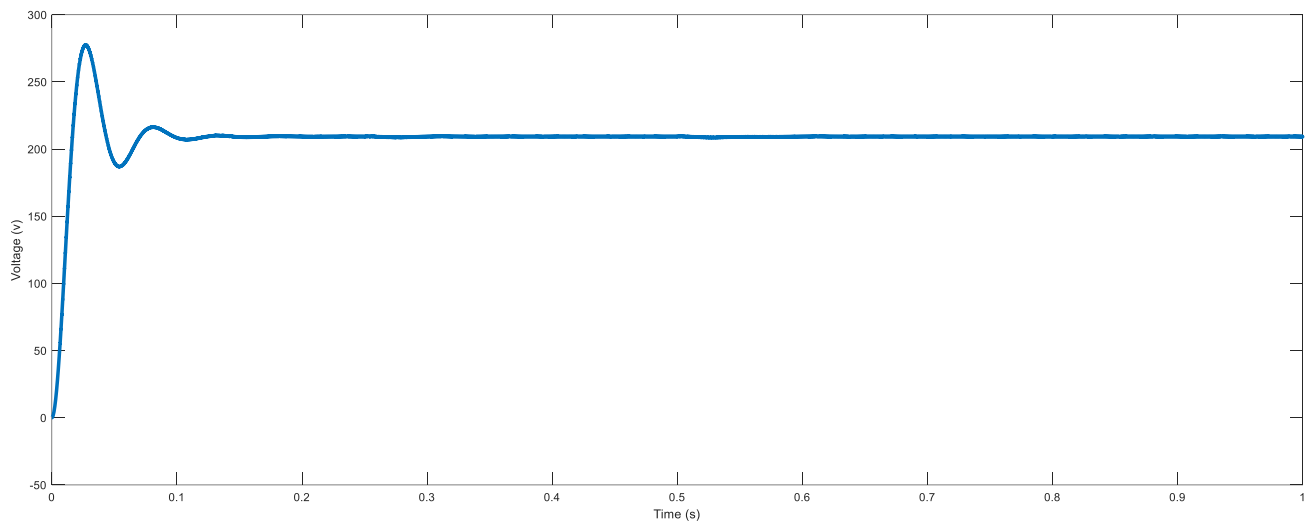


Figure III 2:Tension de sortie du hacheur survolteur.

### III.2.2 Simulation de système photovoltaïque avec la commande P&O :

La figure(28) Le schéma suivant illustre un système photovoltaïque (PV) connecté à un convertisseur boost, accompagné d'un dispositif de suivi du point de puissance maximale (MPPT) (P&O).

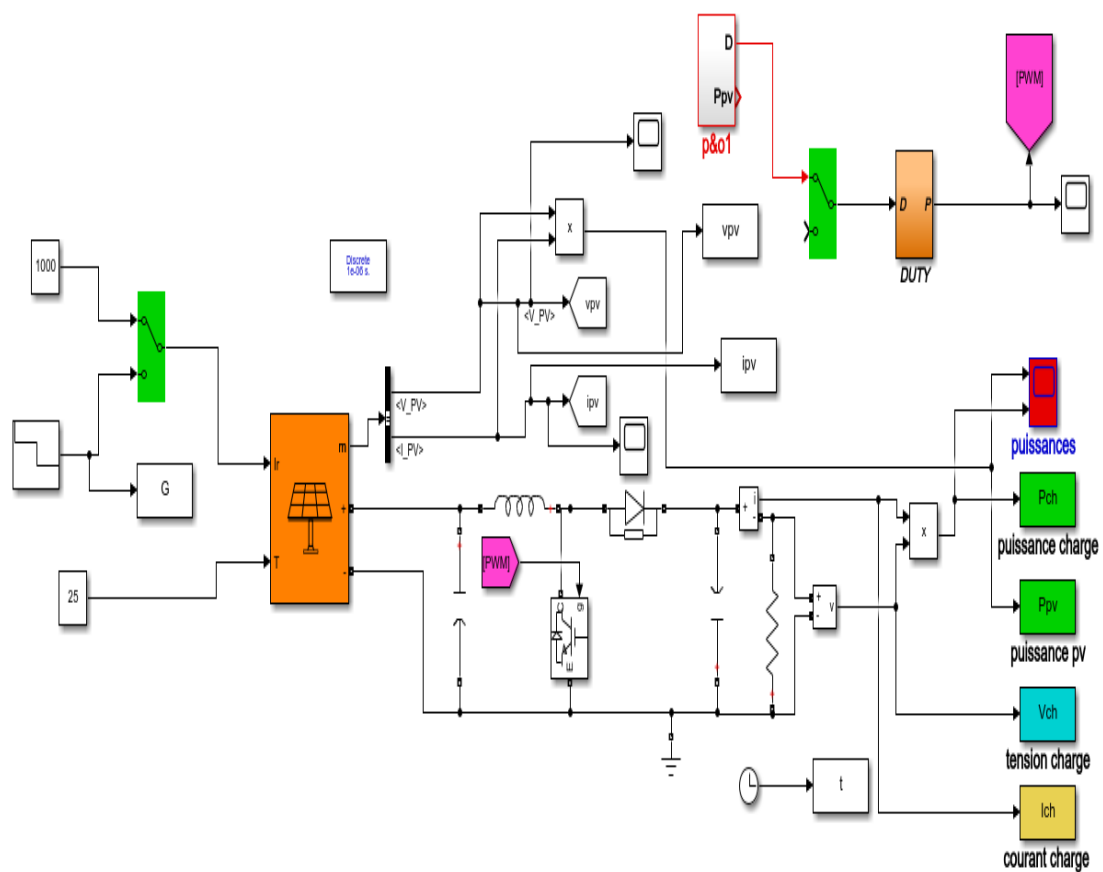


Figure III 3: Schéma MATLAB SIMULINK d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

### III.2.3 Résultats :

#### III.2.3.1 caractéristique de tension :

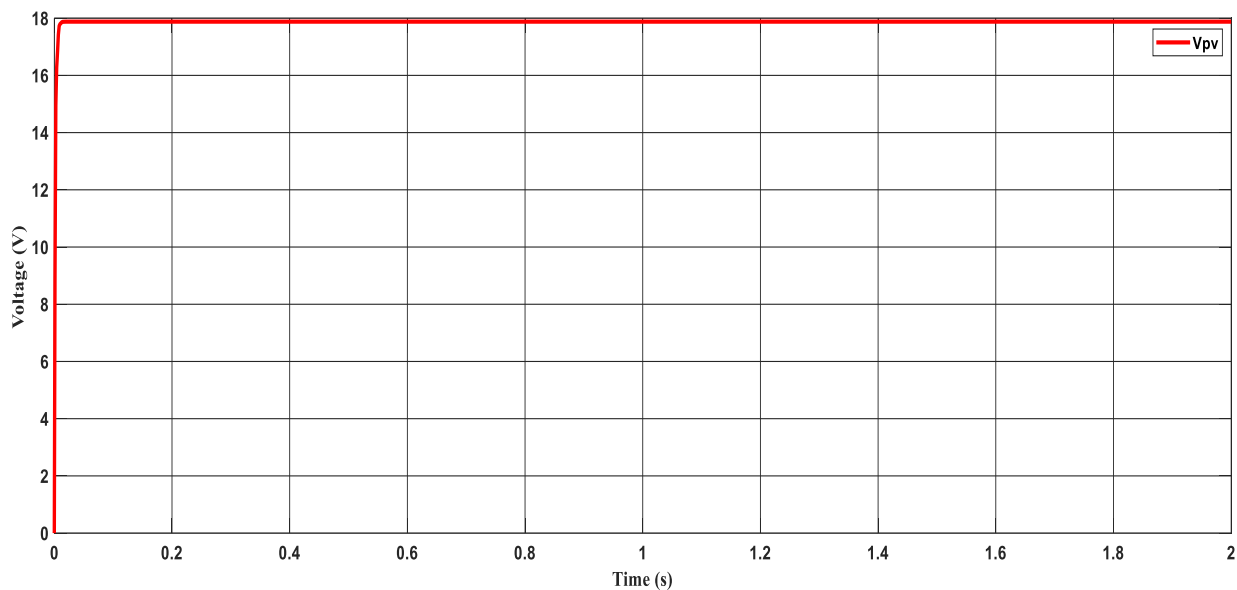


Figure III 4 : voltage générée par la GPV pour  $G=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$ .

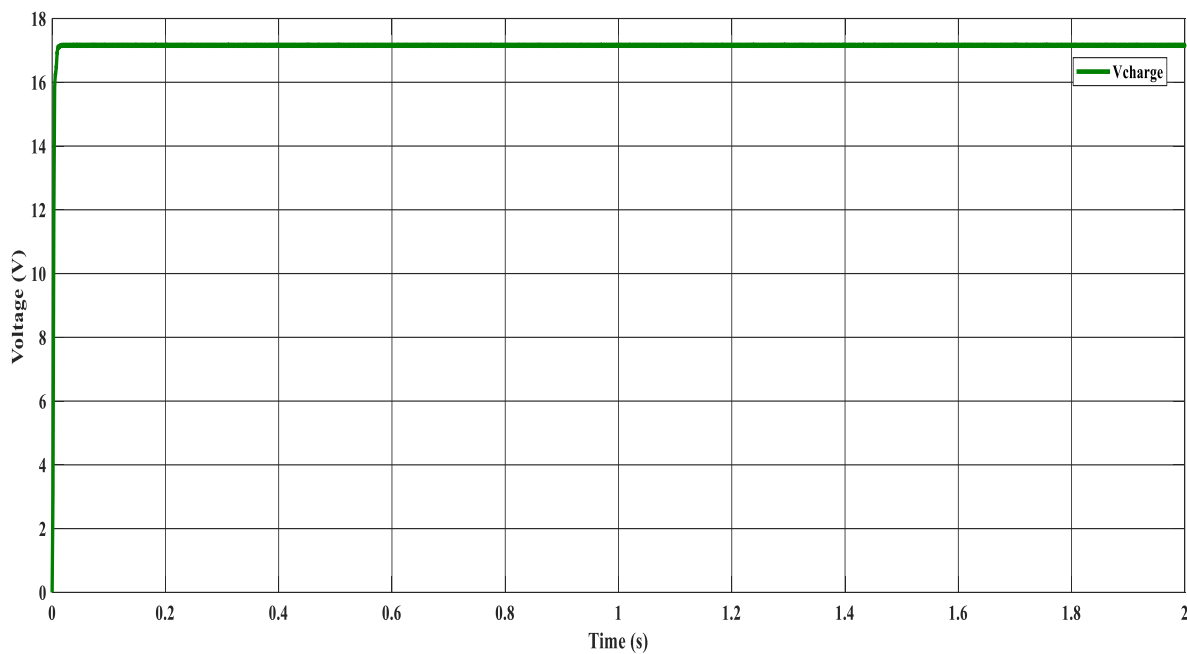
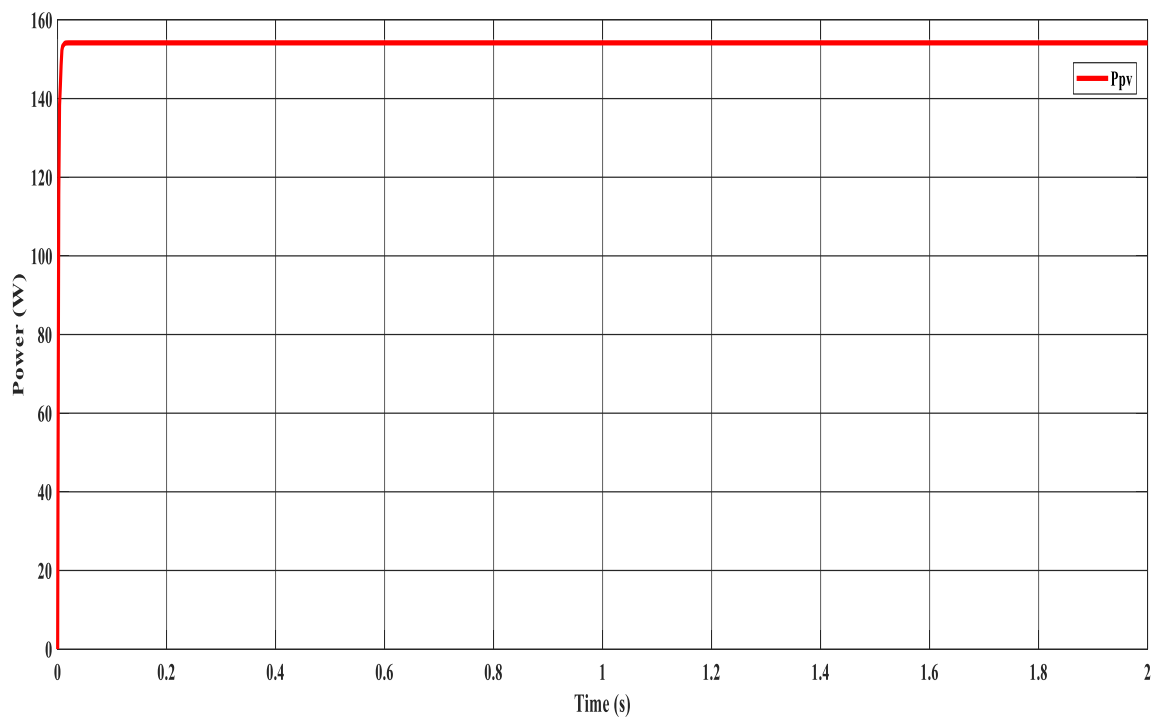
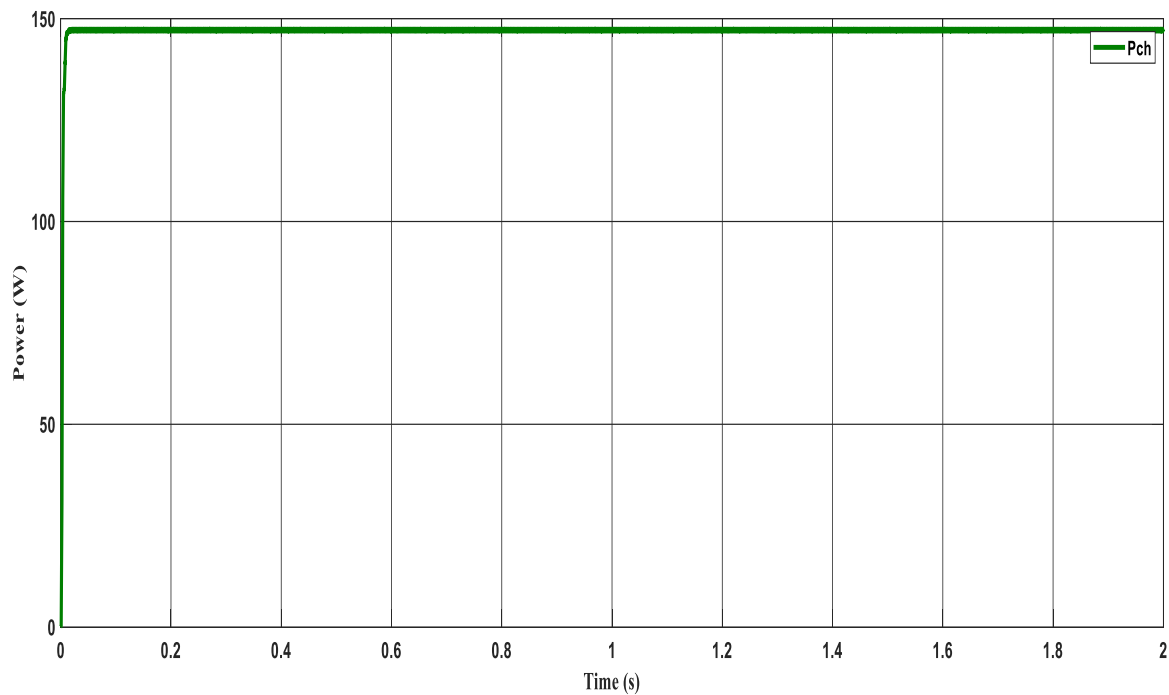


Figure III 5 : Tension de sortie du système pour  $G=1000W/m^2$  et  $T=25^{\circ}C$ .

## III.2.3.2 Caractéristique de puissance :

Figure III 6 : Puissance d'entrée du système pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .Figure III 7: Puissance sortie du système pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

### III.2.3.3 Caractéristique de courant :

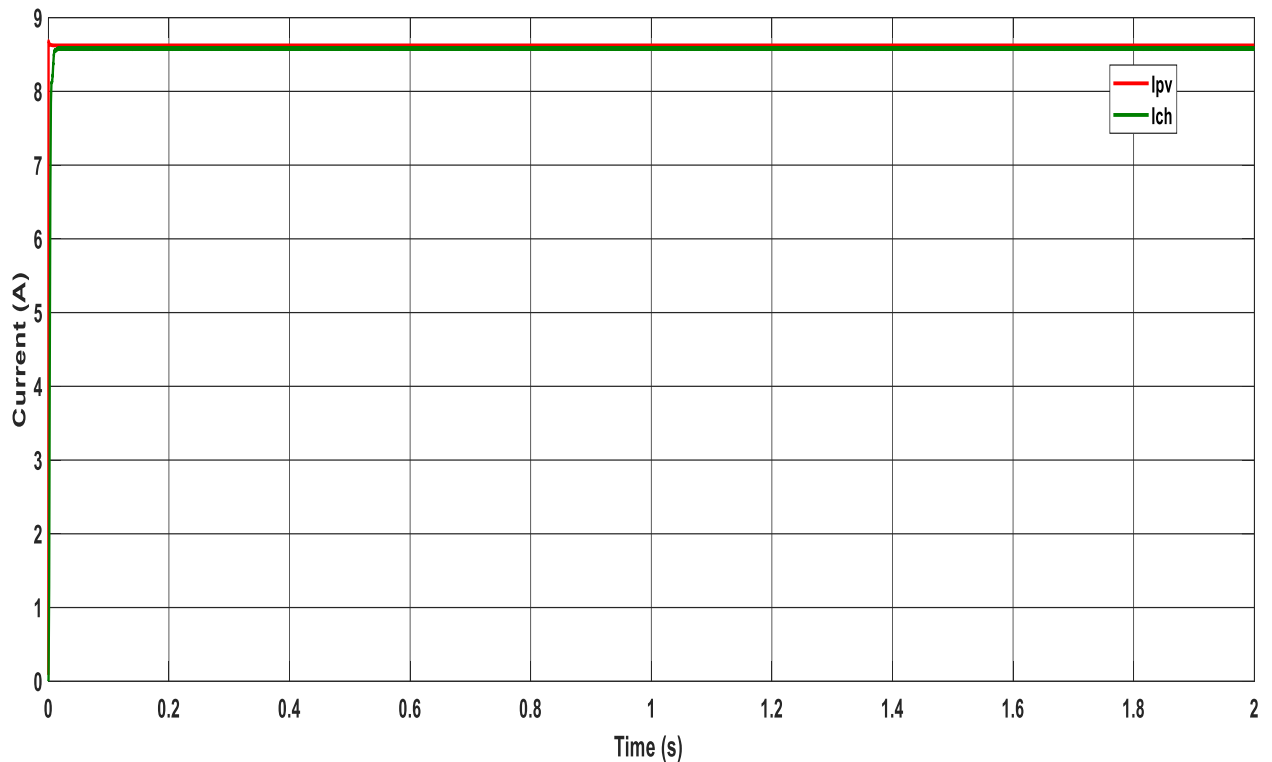


Figure III 8: Courant de l'entrée et sortie du système pour  $G=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ .

Les résultats issus de la simulation du système photovoltaïque, régulé par la méthode MPPT de type « perturbation et observation », sont illustrés dans les figures précédentes. Ces représentations graphiques mettent en évidence la tension et la puissance générées par le module photovoltaïque, ainsi que la tension, le courant et la puissance en sortie du système. Les données obtenues confirment que le convertisseur élévateur (hacheur boost) et l'algorithme MPPT « perturbation et observation » remplissent efficacement leurs fonctions respectives.

### III.2.4. Influence de l'éclairement sur le système :

Les figures suivantes illustrent la relation entre la puissance et le courant et la tension en entrée et en sortie du système photovoltaïque en fonction de différentes valeurs d'éclairement ( $G = 400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$ ), tout en maintenant une température constante de  $25^\circ\text{C}$ . Cette représentation met en évidence l'impact de l'intensité lumineuse sur les performances énergétiques du système, en particulier sur la puissance et le courant et la tension générée par le générateur photovoltaïque et celle délivrée à la charge.

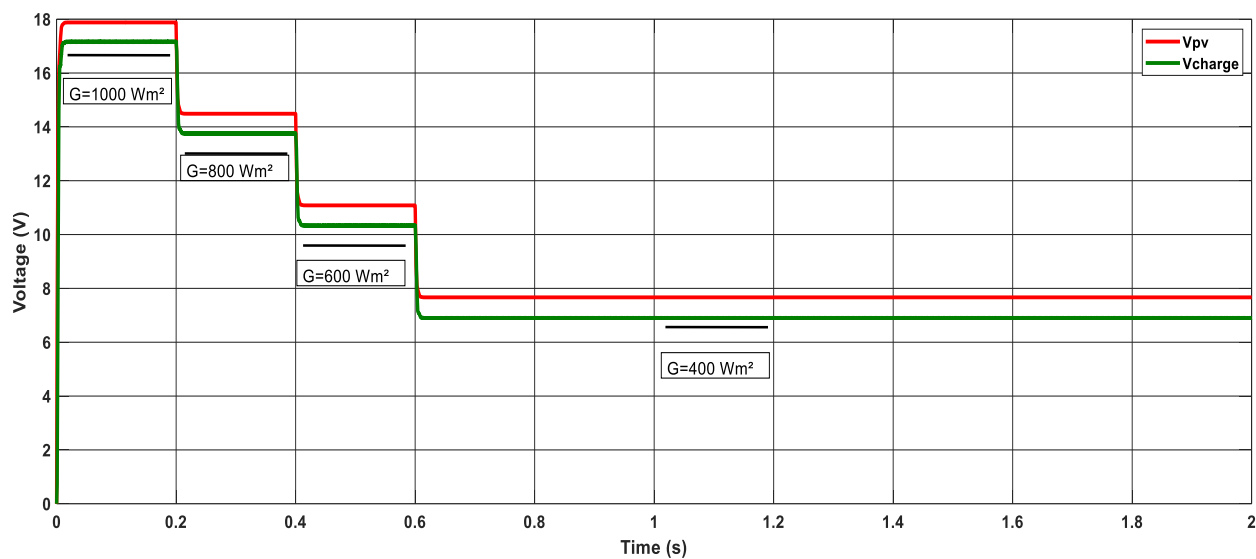


Figure III 9: la tension d'entrée et sortie du système pour T= 25C et différentes irradiation [1000 800 600 400].

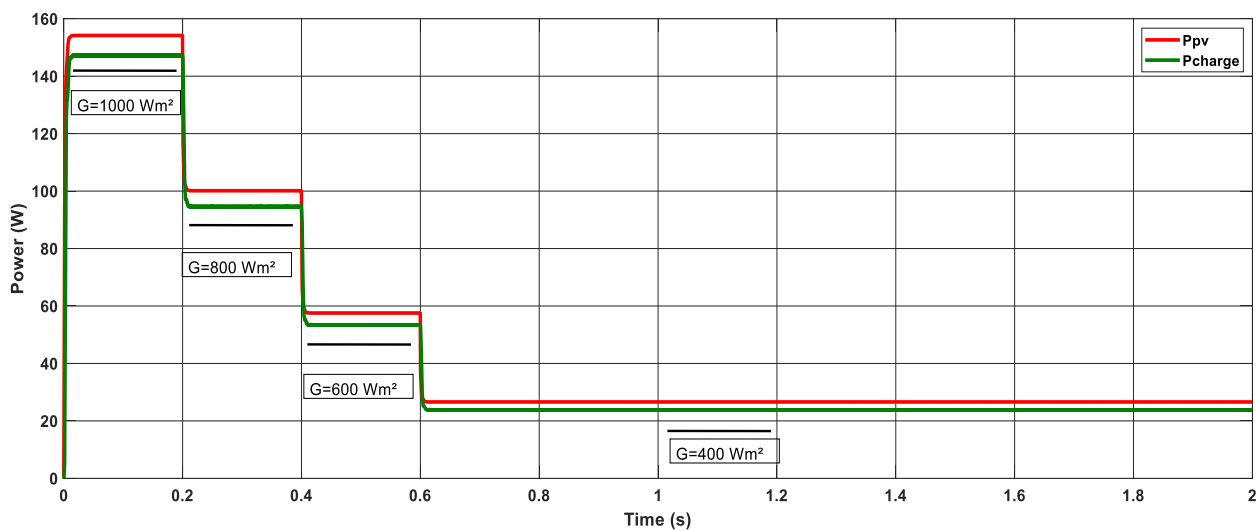
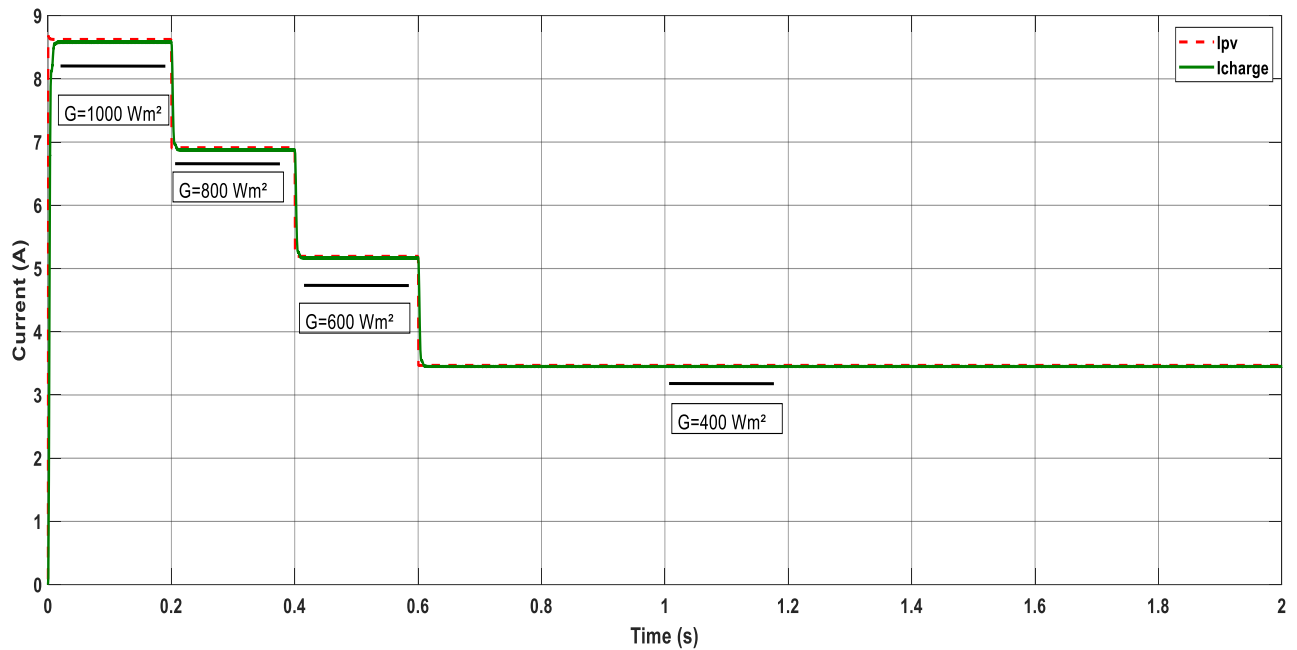


Figure III 10: la puissance d'entrée et sortie du système pour T= 25C et différentes irradiation [1000 800 600 400].



**Figure III 11: le courant d'entrée et sortie du système pour  $T= 25C$  et différentes irradiation [1000 800 600 400].**

Les figures précédentes présentent l'évolution de la tension et la puissance et le courant généré par le système PV. On remarque que lorsque le rayonnement solaire diminue le courant et la tension et la puissance sortant de la cellule solaire diminue ce qui est normal car la quantité d'énergie solaire atteignant le panneau diminue.

### III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) visant à déterminer le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque, en se basant sur des conditions standards d'irradiation ( $G = 1000 W/m^2$ ) et de température ( $T = 25 ^\circ C$ ). Nous avons choisi la méthode de perturbation et observation (P&O). Cette approche consiste à introduire des perturbations dans le système et à observer les variations de puissance en sortie, afin d'ajuster le fonctionnement du générateur photovoltaïque pour qu'il opère à son rendement optimal. La méthode P&O est largement utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son efficacité dans des conditions d'ensoleillement et de température constantes.

# CONCLUSION GENERALE

### **Conclusion :**

Dans le cadre de notre projet, nous nous sommes appuyés sur l'analyse d'une simulation du comportement électrique d'un système photovoltaïque, régulé par une commande numérique de type MPPT, permettant d'extraire la puissance maximale délivrée par le générateur solaire. Ce mémoire porte sur la simulation d'un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). Par la méthode de perturbation et observation (P&O).

Premièrement nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, système photovoltaïque, on a cité les types de cellules PV et nous avons mentionné les avantages et les inconvénients de chaque type.

Après nous nous sommes intéressés aux convertisseurs statiques (DC-DC) employés dans les systèmes photovoltaïques. Nous y avons modélisé les principaux types de convertisseurs, à savoir l'abaisseur (Buck), l'élévateur (Boost) ainsi que le Buck-Boost. Après avoir expliqué le principe de commande MPPT.

Enfin nous avons abordé les moyens de stocker l'énergie électrique photovoltaïque et donné les inconvénients et les avantages de l'énergie PV.

Ensuite, nous avons utilisé le logiciel matlab pour étudier premièrement le rôle de convertisseur boost et deuxièmement le système PV associée à un convertisseur boost contrôlé par MPPT dans les conditions standards ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ).

# Résumé

### Résumé :

Ce mémoire porte sur l'analyse de la simulation du comportement électrique d'un système photovoltaïque, régulé par une commande numérique de type MPPT basée sur l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) et de conductance incrémentale, permettant d'optimiser le suivi du point de puissance maximale du générateur solaire.

Dans notre simulation, on a conçu un générateur PV dans les conditions standards de test (CTS) ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ),  $L=2 \text{ e-}3$  /  $C_{in}=100 \text{ e-}6$  /  $C_{out}=3227 \text{ e-}7$  /  $R_{load}= 2 \text{ hom}$  et un convertisseur survolteur (Boost), les résultats de simulation obtenus sous Matlab.

**Mots clés :** Système PV – Convertisseur survolteur – Commande MPPT – Simulation – Matlab/Simulink.

### الملخص :

نقوم في هذه المذكرة بتحليل المحاكاة لنظام الخلايا الكهروضوئية PV وفق الآلية الرقمية (P&O) لضمان تحقيق استطاعة قصوى التي يوفرها المولد الكهروضوئي .

في هذه المحاكاة قمنا بتصميم مولد كهروضوئي تحت ظروف الاختبار القياسية (CTS) ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ )  $L=2 \text{ e-}3$  /  $C_{in}=100 \text{ e-}6$  /  $C_{out}=3227 \text{ e-}7$  /  $R_{load}= 2 \text{ hom}$  ومحول (Boost)

نتائج المحاكاة المتحصل عليها تمت بواسطة برنامج MATLAB

**الكلمات المفتاحية :** نظام PV - محول تقوية - تحكم MPPT - محاكاة - Matlab/Simulink

### Abstract :

In this thesis, we analyze the simulation of the operation of a photovoltaic (PV) system adapted by a digital MPPT "disturbance and observation (P&O), Incremental (INC)" digital control, ensures the pursuit of maximum power supplied by a photovoltaic generator.

In our simulation, we designed a PV generator under standard test conditions (CTS) ( $G=1000 \text{ W/m}^2$   $T=25^\circ\text{C}$ ) ,  $L=2 \text{ e-}3$  /  $C_{in}=100 \text{ e-}6$  /  $C_{out}=3227 \text{ e-}7$  /  $R_{load}= 2 \text{ hom}$  and a booster converter, the results of simulation obtained under Matlab.

**Keywords :** PV system - Booster converter - MPPT control - Simulation - Matlab/Simulink

# Références Bibliographiques

- 
- [1] IEA, *World Energy Outlook 2023*, International Energy Agency, 2023.
- [2] H. Bellia, R. Youcef, and M. Fatima, “A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB,” *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, vol. 3, no. 1, pp. 53–61, 2014.
- [3] T. Eswam and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.
- [4] M.H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*, 4th ed. Pearson Education, 2014.
- [5] V. Quaschnig, *Les systèmes d'énergies renouvelables*, 1re éd. française. Bruxelles, Belgique : De Boeck Supérieur, 2012.
- [6] S. Mayouf, *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle*, mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.
- [7] A. Bouchakour, *Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque*, thèse de doctorat. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes. 2018.
- [8] O. Gergaud, *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*, Thèse de doctorat en électrotechnique. Ecole normale supérieure de Cachan. 2002.
- [9] A. Chelabi et A. Ibelhoulén, *Etude d'un système hybride autonome*, mémoire de master. Université de Bejaia. 2012.
- [10] J. J. Beziane, *L'énergie solaire*, (18 Nov. 2012).
- [11] A. Luque et S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2011.
- [12] M. Mekhilef, S. Mekhilef, and N. A. Rahim, “Photovoltaic systems: a review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 1975–1985, 2011.

---

[13] H. Mathieu, "*Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques*", 2<sup>ème</sup> Edition, Masson, 1990.

[14] S. Mayouf, *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle*, mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.

[15] A. Labouret et M. Viloz, *Énergie solaire photovoltaïque*, 3e éd. Paris, France : Dunod, 2014.

[16] R. Jimmy et al. *Le pompage photovoltaïque*, Édition Multi mondes, 1999.

[17] B.Yacoubi , *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau*, mémoire de master ,université Belkaid Tlemcen,2016.

[18] Khezar « Optimisation de chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque en énergie électrique » Thèse de doctorat de L'Université El-Hadj Lakhdar - Batna 1 (2017).

[19] M. Belkacem, « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) », mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid De Tlemcen, 2015.

[20] Mambrini T. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de Doctorat. Université Paris Sud École doctorale : STITS, 2014.

[21] C.Hamida, H. Ratiba, « *modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau*», mémoire de master, université AbouBakre Belkaïd de Tlemcen, 2016.

2012

[22] B.Bendib, « Techniques conventionnelles et avancées de MPPT pour des applications photovoltaïques: étude comparative », mémoire de Magister, département d'Electronique .Université Ferhat Abbas-Sétif 2007

- 
- [23]** N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2003.
- [24]** B. Wu, *High-Power Converters and AC Drives*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press/Wiley-Interscience, 2006.
- [25]** J. Rodriguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002
- [26]** T. Esum and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007
- [27]** R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed. Boston, MA, USA: Springer, 2001.
- [28]** T. Esum and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, Jun. 2007.